



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Jüri Juurikas

**VAAKUMSOOJUSTUSPANEELIDE OMADUSTE UURIMINE
VÕRDLUSMEETODIL**

**THE REASEARCH OF VACUUM INSULATION PANELS
PROPERTIES WITH COMPARISON METHOD**

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: Tõnis Teppand, *MSc*

Tartu 2017

SISUKORD

1. SISSEJUHATUS.....	6
2. ÜLEVAADE TÄNAPÄEVA SOOJUSTUSMATERJALIDEST.....	9
3. VAAKUMSOOJUSTUSPANEEL.....	11
3.1. Vaakumsoojustuspaneeli ajalugu.....	11
3.2. Vaakumsoojustuspaneeli omadused.....	11
3.3. Vaakumsoojustuspaneeli ehitus.....	12
3.4. Vaakumsoojustuspaneeli tööpõhimõte.....	12
3.4.1. Soojusülekanne ehk konvektsioon.....	13
3.4.2. Soojusjuhtivus ehk konduktsioon.....	14
3.4.3. Soojuskiirgus.....	14
3.4.4. Vaakum.....	15
3.4.5. Sisemine gaasikeskkond.....	16
3.4.6. Pürogeenne ränioksiid.....	16
4. KATSEMETOODIKA.....	17
4.1. Katsekehad.....	17
4.2. Kasutatud seadmed/abivahendid.....	18
4.2.1. Kuumaplaat „HP3805B“.....	18
4.2.2. Termokaamera „Milwaukee M12™“.....	19
4.2.3. Digitaalne nihik „Edwin Digital Caliper 150mm“.....	21
4.2.4. Soojusisolaator „Super Isol“.....	22
4.3. Meetodi kirjeldus.....	23
5. KATSETULEMUSED.....	26
5.1. Katse I etapp.....	26
5.2. Algnäidu leidmine.....	27
5.3. I etapi materjali paksuste võrdlemine.....	28
5.4. I etapi eeldused ja järeldused.....	29
6. Katse II etapp.....	30
6.1. Katse II etapi järeldused.....	32
7. Katse III etapp.....	34

7.1. Kaalumuutus peale külmatsükleid.....	35
7.2. Katse III etapi järelused.....	37
8. Kokkuvõte.....	39
Kasutatud kirjandus.....	42
SUMMARY.....	44
LISAD.....	46
Lisa 1. Katsekehade temperatuuride tõus katse I etapis.....	46
Lisa 2. Katsekehade paksuse muutus katse I etapis.....	49
Lisa 3. Katsekehade temperatuuride tõus katse II etapis.....	51
Lisa 4. Katsekehade temperatuuride tõus katse III etapis.....	54
Lisa 5. Katsekehade pildid.....	55
Lisa 6. Katsekehade termopildid.....	58

1. SISSEJUHATUS

„The European Union has decided to decrease the energy use for heating of buildings with 50% in 2050. To reach the target, the amount of insulation in the building envelope has to increase.“¹ (Johansson, 2012: 5)

Antud magistritöö teema sai valitud selle järgi, et projekteerimist õppides ja tööl praktiseerides on pidevalt näha, kuidas uusehitistele seatavad soojapidavuse miinimumnõuded muutuvad aasta-aastalt rangemaks ja nende täitmine keerulisemaks. Lähtudes praegusel hetkel nõutavast ja aastaks 2050 esitatavatest nõuetest on selge, et praegused lahendused mineraalvilla, kivivilla ja EPS'i² näol on ajast maha jäämas. Kui Euroopa Liit nõuab aastaks 2050, et kõik hooned peavad kulutama kütmisele poole vähem energiat (Euroopa Ühenduste Komisjon, 2008), siis tuleks varakult hakata uurima uusi ja efektiivsemaid lahendusi nende nõuete täitmiseks. Lahendus võib peituda siiani vähepopulaarsetes vaakumsoojustuspaneelides.

Vaakumsoojustuspaneelide puhul on tegemist lahendusega, mille ajalugu on suhteliselt lühike. Siiani on seda kasutatud peamiselt kosmosetehnoloogias ja rasketööstuses, kus on vaja isoleerida kas väga kõrge või väga madala temperatuuriga ruume ning seadmeid. Sellest tingituna ei ole sel teema tehtud ka palju uurimustöid, mis tõestaks, et vaakumsoojustuspaneeli kasutuselevõtmine tsiviilehituses oleks õigustatud. Väheseid artikleid ja uurimistöid, mis on olnud avalikult kättesaadavad, on kasutatud antud magistritöö käigus võrdlusmaterjalina ja viidetena.

Kuna vaakumsoojustuspaneeli sooja-erijuhtivus [$\lambda(W/m \cdot K)$] on varasemalt katsetatud ka väljaspool tootjapoolseid laboreid, siis selles uurimistöös keskendutakse sellele, mismoodi muutuvad materjali omadused ehituse käigus tekkivate võimalike kahjustuste tagajärjel.

¹ „Euroopa ühenduste komisjon on otsustanud vähendada hoonete kütmiseks kuluva energia hulka 50% aastaks 2050. Et jõuda seatud eesmärgini peab soojustuse kihilaksus hoone väliskonstruksioonis suurenema.“

² EPS=Vahtpolüstüreen

Kuna vaakumsoojustuspaneeli näol on tegemist praegusel hetkel madalaima sooja-erijuhtivusega [$\lambda(W/m^{\circ}K)$] soojustusmaterjaliga, siis tundub selle kasutamine igati mõistlik, aga sellega kaasnevad ka teatud riskid, mille uurimisele ma antud magistritöös ka keskendun.

Peamised probleemid võivad tekkida materjali lohakal paigaldamisel, seejärel tuleb tagada materjali tervena püsimine kogu ehitise eluea vältel. Kuna vaakumpaneeli pealmise kihi lõhkumisel rikutakse ka materjali sees olev vaakumkeskkond, siis selle tagajärjel suurendatakse ka materjali sooja-erijuhtivust [$\lambda(W/m^{\circ}K)$]. Kuna aga materjali ruutmeetri hind on võrreldes teiste soojustusmaterjalidega oluliselt kõrgem, siis on tähtis kontrollida, kas paneeli pealispinda võimalikud tekkivad augud kujutavad endast piisavalt suurt probleemi selleks, et lugeda vaakumsoojustuspaneel kasutuskõlbmatuks.

Antud magistritöös plaanitakse kontrollida vaakumsoojustuspaneeli pinnakatte lõhkumise tagajärjel toimuvaid muutusi materjali sooja-erijuhtivusele [$\lambda(W/m^{\circ}K)$]. Selle tegemiseks kasutatatakse kaheksat erinevat katsekeha, mis on jagatud paari kaupa erinevatesse gruppidesse:

- 1. grupp – täielikult puutumata ja terved katsekehad, mida kasutatakse algandmete kontrollimiseks. Lisaks koormatakse neid survega 1MPa.
- 2. grupp – katsekehadele on sisse tehtud auk, mis imiteerib kruvi või naela poolt lõhutud soojustuspaneeli pinda. Lisaks koormatakse neid survega 1MPa.
- 3. grupp – katsekehadele on sisse tehtud auk, mis imiteerib kruvi või naela poolt lõhutud soojustuspaneeli pinda, kuid kohe peale paneeli pinna lõhkumist on see kaetud kuumakindla teibiga (vt. lk. 24), mis takistab edasist niiskuse ning õhu sissepääsu. Neid katsekehasid ei ole koormusega survestatud.
- 4. grupp – katsekehadele on sisse tehtud auk, mis imiteerib kruvi või naela poolt lõhutud soojustuspaneeli pinda. Katsekehasid ei ole survestatud ning nende pealiskestas olevaid auke ei ole teibiga kaetud.

Kõik neli gruppi läbisid peale esmaseid katseid kolme päeva jooksul viis külmatsükli, mille eesmärk on võimaldada õhul ja (õhu)niiskusel tungida pealispinnale tehtud aukude kaudu paneeli sisse. Enne esimest külmatsükli ning samuti ka peale viit külmatsükli on katsekehad üle kaalutud, et kontrollida, kui palju läbi avade niiskust sisse pääses.

Töö käigus saadud andmed annavad sõltumatuid tulemusi selle kohta, kuidas muutuvad materjali soojapidavusomadused erinevate välismõjutuste korral. Tulemusi saab kasutada järelduste tegemiseks, mis aitavad otsustada, kas tegemist on konkurentsivõimelise tootega või mitte. Samaaegselt võiksid uurimuse potentsiaalsed positiivsed tulemused anda võimaluse tootel saavutada laiemat levikut ka tsiviilehituses, kui energiasäästlikkuse ja maksumuse suhe jääb konkurentsivõimeliseks.

Magistritöös kasutatud uurimismetoodika põhineb võrdleval meetodil. See tähendab, et tulemuste saamiseks kasutatakse kuumaplaati, termokaamerat ning lasertemperatuurimõõdikut ning võrreldakse erinevates tingimustes olnud paneele konkreetses järjekorras, et näha muutusi materjali sooja-erijuhtivuses [$\lambda(W/m \cdot K)$].

Uurimuse esimene pool põhineb suures osas teoreetilise osa ja paneeli füüsikaliste omaduste selgitamisel. Selle eesmärk on täpsemalt seletada paneeli sisemuses toimuvaid protsesse, mis tagavad paneeli madala soojusjuhtivuse ning vaakumkeskkonna püsimise.

Antud magistritöö juhendamise eest tänan Tõnis Teppandit tema abi ja nõuannete eest, kellega koostöö on sujunud väga latusalt. Samuti sooviksin tänada Tartu Ülikooli Füüsika Instituudi materjaliteaduste vanemteadurit Rünno Lõhmust, kes aitas jõuda magistritöö uurimismetoodika lõpliku tehnilise lahenduseeni. Lisaks tänan veel ettevõtet Porextherm Dämmstoffe GmbH, kes oli nõus katsete läbiviimiseks toetama vajalike katsekehadega.

2. ÜLEVAADE TÄNAPÄEVA SOOJUSTUSMATERJALIDEST

Soojustusmaterjalid, mida me kasutame tänapäevases ehituses, põhinevad peamiselt sellel, et kasutatakse õhu omadust olla halb soojusjuht. See tähendab seda, et kivivill, mineraalvill ja EPS kasutavad soojuse liikumise takistamiseks õhku ennast. Üldiselt toimub see vastava materjali pooridesse ja kiudude vahele jäävate õhukambrite ja tühimike abil. Soojustusmaterjali struktuur ise on mõeldud takistama õhu konvektsiooni. Mida tõhusamalt seda tehakse, seda parem sooja-erijuhtivus [λ] saadakse. Tänapäeval peamiselt kasutusel olevate soojustusmaterjalide sooja-erijuhtivused [λ]:

- kivivill-0,039W/mK (Õiger, et al., 2014, lk. 149)
- klaasvill-0,032W/mK (Õiger, et al., 2014, lk. 149)
- EPS-0,036W/mK (Õiger, et al., 2014, lk. 149)

Ehkki tänapäeval kasutatavad soojustusmaterjalid on siiani olnud piisavalt efektiivsed ning hoonete soojatakistus [$R(m^2K/W)$] on piisav praeguste normide täitmiseks, tuleb arvestada sellega, aastal 2050 jõustuvad Euroopa Ühenduste Komisjoni direktiivid nõuavad küttele kuluva energia langetamist poole võrra (Euroopa Ühenduste Komisjon, 2008). See tähendab üldjoontes seda, et praegu kasutatavate materjalide puhul tuleb arvestada hoone soojustamisel 400-500mm kivivilla/mineraalvilla/EPSi kihiga.

Tänapäeva tihedas asustuses on projekteerimisel ehitusaluse pinna iga ruutmeeter arvel ning seega on sellise paksusega seinad ebapraktilised. Sellise lahenduse puhul kulutatakse hoone soojustamisele kaks korda enam finantse ning samaaegselt kaotatakse oluliselt ka müüdava pinna arvelt. Samuti suureneb märgatavalt sõlmede ehitustehnilised lahendused. See kõik tähendaks olulist ruutmeetrihinna tõusu, mis omakorda vähendab konkurentsivõimet. „Riigi Teataja“ andmetel kehtib praeguse seisuga energiatõhususnorm, mis eramute puhul nõuab aastaseks energiakuluks 160kwh/m² aastas (Hoone energiatõhususe miinimumnõuded 2017, § 3 lg 3).

Euroopa Komisjoni otsusega nõutav 50% energiakulu langetamine tähendaks siinkohal seda, et hoone energiakulu aastas peab langema eramute puhul 80kwh/m² aastas, mis praeguste lahenduste juures annab mõtteainet nii ehitusinseneridele kui ka materjalitootjatele.

3. VAAKUMSOOJUSTUSPANEEL

3.1. Vaakumsoojustuspaneeli ajalugu

Esimene vaakumsoojustuspaneel pärineb aastast 1930, kui Saksamaal kinnitati kummiga kaetud poorse materjali patent. Umbes 20 aastat hiljem kinnitati USA's patent fooliumiga kaetud klaasvillale. Esimene nanostruktuurist sisemusega paneeli patent kinnitati aastal 1963. Vaakumsoojustuspaneelide arendamine jätkus erinevate sisemiste materjalide eksperimenteerimiste ja erinevate katmisviisidega. Tõusev nõudlus toidu-, meditsiini- ja tehnoloogiatööstuse poolt kiirendas õhukeste ja madala soojuslabilaskvusega materjalide tootmist. (Johansson, 2012: 12)

3.2. Vaakumsoojustuspaneeli omadused

Korralikult vaakumis ja kuiv vaakumsoojustuspaneel koos ränioksiidi katva õhukindla fooliumkihiga annab sooja-erijuhtivuseks $[\lambda(W/m^{\circ}K)]$ peale tootmist $0,004W(m^{\circ}K)$, mis on mõõdetud suure paneeli keskmisest osast. Keskmist sooja-erijuhtivust paneelil tõstavad külmasillad, mis, tekivad paneele katvate fooliumkihtide äärtesse paneelide vahel. Nende külmasildade mõju on erinev olenevalt paneelide paigutusest, paksusest ning ümbritsevatest materjalidest. (Binz et al. 2005, lk. 7-8)

Isegi korralikult toodetud vaakumsoojustuspaneel võtab oma eluea jooksul sisse väikese koguse õhku, mis tõstab sisemist rõhku üle lubatud normi ja vähendab sellega ühtlasi soojatakistust $[R(m^2K/W)]$. Võttes arvesse tekkivad külmasillad ja vananemise käigus tekkinud õhurõhu tõusu paneelis, lisatakse kogu sooja-erijuhtivusele $[\lambda(W/m^{\circ}K)]$ mõlema eest lisaks $0,001-0,002W(m^{\circ}K)$, mis korrektelt paigaldatud ja mittevigastatud paneeli puhul annab kogu paneeli keskmiseks sooja-erijuhtivuseks $0,006-0,008 W(m^{\circ}K)$. (Binz et al. 2005, lk. 8)

Tänu seitse korda madalamale sooja-erijuhtivusele [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] on vaakumsoojustuspaneel materjal, mille kasutamine annab suure eelise kohtades, kus ruumi on vähe. Kuna tegemist on teiste soojustusmaterjalidega võrreldes kalli materjaliga, siis praegu kasutatakse seda pigem tööstuses kuumade või külmade ruumide ja masinate isoleerimisel. Samuti on see kasutusel kosmosetehnoloogia juures, kus see kaitseb temperatuuritundlikke detaile. Lisaks juba mainitud kasutusvõimalustele võib antud materjal leida kasutust ka muinsuskaitsealuste hoonete renoveerimisel, kus on keelatud hoone välisfassaadi muutmine. Kuna tegemist on väga õhukese materjaliga, siis on võimalik sellega katta hoonete karniise ja pilastreid nii, et hoone välisilme ei muutu. See annab omakorda võimaluse arendajatel tegeleda vanade majade korrastamisega ilma kartmata, et hoonete soojustamine oleks muudetud ülemäära keeruliseks.

3.3. Vaakumsoojustuspaneeli ehitus

Vaakumsoojustuspaneel koosneb peamiselt kolmest komponendist: sisemuses paiknevast ränioksiidist, pehmest aluskihist ja pealmisest fooliumkihist. Lisaks kolmele tahkele materjalile kasutatakse ka gaasi, mis aitab sulgeda võimalikke tekkivaid mikrokahjustusi, et vältida vaakumi kadumist paneelis e. asendumist õhuga.

Kui kõik tuntud soojustusmaterjalid kasutavad sooja liikumise peatamiseks õhukambreid või kiududevahelisi tühimikke, siis vaakumsoojustuspaneelil on sooja-erijuhtivust [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] vähendavaks teguriks õhu ja osakeste puudumine ehk vaakum.

3.4. Vaakumsoojustuspaneeli tööpõhimõte

Soojuse liikumiseks kehalt kehale või keskkonnast kehale on füüsikaliselt kolm võimalust: soojusülekanne ehk konvektsioon, soojusjuhtivus ehk konduktsioon ja soojuskiirgus. Vaakumsoojustuspaneelis on proovitud elimineerida neid tegureid. Kaks võimalust kolmest, konduktsioon ja konvektsioon, on tänu vaakumile praktiliselt elimineeritud ning peamiseks soojuse edasikandjaks vaakumsoojustuspaneeli puhul on soojuskiirgus, mida ei ole võimalik elimineerida, sest puudub võimalus kasutada katematerjalina sellist kihti, mis suudaks kogu soojuskiirgust tagasi peegeldada. (Johansson, 2012: 15)

3.4.1. Soojusülekanne ehk konveksioon

Kui vaadata küünla või tuletiku leeki, on jälgitav soojusenergia transport ülespoole kovektsiooni abil. Selline energia ülekanne toimub siis, kui voolis nagu õhk või vesi satub kontakti esemega, mille temperatuur on kõrgem voolise temperatuurist. (Heat Transfer, 2017)

Voolise selle osa temperatuur, mis on kontaktis kuuma esemega, kasvab ja (enamikel juhtudel) see vooliseosa paisub ning seega tihedus kahaneb. Kuna paisunud voolise tihedus on nüüd väiksem kui ümbritseval külmemal voolisel, sunnib üleslükkejõud teda ülespoole kerkima. Osa ümbritsevast voolisest voolab nüüd üleskerkinud kuumema voolise asemele ja protsess jätkub.

Konveksioon on osaline paljudes looduslikes protsessides. Atmosfääri konveksioon mängib põhjapanevat rolli globaalsete kliimamustrite kujunemisel igapäevastes ilmapuutustes. Purilendurid ja linnud otsivad tõusvaid õhuvoole (sooja õhu konveksioonivoolud), mis neid õhus hoiavad. Tohutud energiasiirded leiavad aset ookeanides tänu konveksiooniprotsessidele. Ka Päikesel transporditakse energiat selle südames asetsevast „tuumaahjust“ pinnale hiiglaslikes konveksioonirakkudes, kus kuum gaas kerkib pinnale raku keskel ja külmem gaas sukeldub pinna alla raku servades.

Seega on kõige olulisem ja ka tehniliselt kõige lihtsam takistada konveksiooni mõjul liikuvat soojusenergiat. Kuna vaakumsoojustuspaneelis (järele jääb rõhk 0,03 torri) praktiliselt puudub õhk ja puuduvad õhku moodustavad molekulid ja aatomid, siis ei saa konveksiooni mõjul töötav soojusenergia liikumine toimuda, sest vaakumruumis puuduvad osakesed, mis saaksid soojenenud pinnalt kanda energiat edasi teisele vaakumruumi poolele.

3.4.2. Soojusjuhtivus ehk konduktsioon

Kui te jätta metallist ahjuroobi ots tulle piisavalt kauaks, muutub selle käepide tuliseks. Energia kantakse tulest käepidemele mööda roopi sooja-erijuhtivuse [$\lambda(\text{W/m}\cdot\text{K})$] abil. Metalli aatomite ja elektronide võnkeamplituudid roobi tulepoolses otsas muutuvad suhteliselt suureks ümbruse kõrge temperatuuri tõttu. Kasvanud võnkeamplituudid ja nendega seotud energia kantakse edasi piki roopi aatomilt aatomile naaberaatomite põrgete tagajärjel. Sel viisiil laieneb kõrgema temperatuuri piirkond mööda roobivart. Lühidalt võib konduktsiooni vaadata kui energia ülekannet suurema energiaga kehalt väiksema energiaga kehale, mida põhjustab osakeste vaheline kokkupuude (Incropera, Dewitt, Bergmann & Lavine, 2011, lk. 3).

Konduktsiooni näol toimuva soojuse liikumise puhul on tegemist küllaltki aeglase protsessiga, mille käigus ei toimu otseselt mingit molekulaarvõrestiku ega materjalide enda liikumist või muutumist. Kuna konduktsiooni töötamise eelduseks on tahkes aines toimuv osakeste vaheline võnkumine, mis kannab soojust edasi, siis vaakumsoojustuspaneeli puhul on kasutatud selle nähtuse vähendamiseks ränioksiidi, mille kasutamine vaakumkeskkonnas tagab kerge ning kõrge soojatakestusega [$R(\text{m}^2\text{K/W})$] soojustuspaneeli.

3.4.3. Soojuskiirgus

Kolmas viis, millega keha ja ümbritsev keskkond saavad vahetada energiat, on elektromagnetlainete kaudu – nt nähtav valgus on elektromagnetlainete üks liik („Thermodynamics – Theory“, 2017) . Sel viisil üle kantud energiat nimetatakse sageli soojuskiirguseks, eristamaks seda elektromagneetilistest signaalidest (mida kasutatakse nt telesaadete edastamiseks) ja tuumakiirgusest (aatomituumade poolt kiiratud energia ja osakesed, radioaktiivne kiirgus). Kui seista suure tule lähedal, soojendab tule soojuskiirguse neeldumine keha, s.t keha soojusenergia kasvab, samal ajal kui tulel see kahaneb. Soojuse ülekandeks kiirguse abil ei ole vaja keskkonda. Kiirgus levib ka vaakumis, nt Päikeselt maale.

Radiatsiooni intensiivsust saab iseloomustada footonite arvu kokkupuutel mingil kindlal pindalal ühes sekundis, mis on korrutatud teguriga $h\nu$, mis näitab footoni energiakogust. Footonite energiakogus ei olene mitte intensiivsusest, vaid on proportsionaalses sõltuvuses radiatsiooni lainepikkusega. Footonitel puudub mass ja vaakumis liiguvad nad valgusekiirusel. („Thermodynamics – Theory“, 2017)

Radiatsioon on ainus soojusjuhtimise liik kolmest, mida vaakum ei aita välistada, vaid pigem isegi võimendab. Selle tõttu kasutatakse radiatsioonipoolse soojusjuhtimise vähendamiseks ja piiramiseks paneeli katvat fooliumkatet, mis aitab tagasi peegeldada suuremat osa soojusenergiast.

3.4.4. Vaakum

Vaakumi mõiste kui selline sündis oluliselt enne kaasaegset füüsikat. Vaakum võeti kasutusele selleks, et oleks võimalik rääkida mateeria puudumisest Vanas Kreeka perioodil. Sama termin võeti uuesti kasutusele 17. sajandil, kui tehnoloogilised vahendid suutsid anumatest õhku välja pumbata. Sel ajal oli tegemist veel siiski osalise väljapumpamisega, millega kõigest vähendati anuma rõhku. (Rafelski, Müller, 1985, lk. 4)

Üks vanimaid teaduslikke küsimusi, mis veel tänapäevani paneb teadlasi mõtlema, puudutab tühja ruumi. Kvantmehaanika ütleb, et absoluutselt tühja ruumi ei saa eksisteerida ja toetudes A.Einsteini üldisele relatiivsusteooriale, siis on ruum alati mõjutatud ja kui täpsem olla, siis painutatud ruumis asuvate objektide poolt (Pidgeon, 2004, lk 58).

Tänapäevases mõistes loetakse vaakumiks ruumi olekut, kus temast on eemaldatud selles asuvad gaasid ja sellega on oluliselt vähendatud ruumis olevat rõhku, võrreldes atmosfääri rõhuga (Rafelski, Müller 1985, lk. 3). Tänu gaaside eemaldamisele on ruumist eemaldatud ka molekulid ja aatomid, mis mängivad vastutavat rolli konvektsiooni ja konduktsiooni toimimisel.

Vaakumi loomiseks vaakumsoojustuspaneelides kasutatakse vaakumkambreid, mille sees toimub kogu paneeli enda isoleerimisprotsess, et vältida maksimaalselt õhu ligipääsu paneeli sisemusele.

3.4.5. Sisemine gaasikeskkond

Vaakumkeskkondades kasutatakse gaasi (nt. Tallium), mis seob gaasid oma pinnale ja seda kasutatakse kõrgetasemelise vaakumi säilitamiseks vaakumkeskkondades. Tegemist on spetsiaalse metallisulamiga, mis paigaldatakse vaakumkeskkonda selle tootmisprotsessi ajal ja see aurustub, kui vaakumkeskkonnast õhk eemaldatakse. Kui aurustunud metall hakkab kondenseeruma, siis see seob endasse vaakumkeskkonda jäänud õhumolekulid. Seda tuntakse ka „degaseerija“ nime all. (McGraw and Hill, 2003, lk. 166)

Tegemist on ainega, mida kasutatakse keemilise reaktsiooni abil väikeste koguste erinevate ainete eemaldamiseks süsteemist keemilise reaktsiooni abil. Näiteks võib kasutada magneesiumi selleks, et eemaldada süsteemist viimased jäänukid õhust, saavutamaks kõrgetasemelist vaakumit. (Dictionary of Chemistry, 2004, lk. 259)

3.4.6. Pürogeenne ränioksiid

Pürogeenne ränioksiid koosneb mikroskoopilistest kerakujulistest osakestest, mis moodustavad lühikesi, aga väga paljuharulisi kette pikkusega 0,1-0,2 mikronit. Kerakujulised osakesed on kogu materjali ulatuses väga sarnaste mõõtudega, aga moodustatud kettide pikkused võivad ulatuda 10-30 osakeseni. (Hubbard, 2006, lk. 4504)

Pürogeenset ränioksiidi valmistatakse räni tetraoksiidi põletamisel vesiniku ning hapniku käes 1800°C juures, mille tagajärjel tekivad sulatatud räni dioksiidi kerakujulised osakesed ning eraldub veel vesinikkloriidi. Vastavalt tootmisprotsessi parameetritele on võimalik muuta ränioksiidi kerakujuliste osakeste läbimõõtu. (Hubbard, 2006, lk. 4503)

4. KATSEMETOODIKA

4.1. Katsekehad

Katsekehadeks on võetud kaheksa erinevat risttahuka kujulist katsekeha, mis kõik on originaalis täpselt samade füüsikaliste näitajatega ning ei erine teineteisest millegi poolest. Katsekehad on 10mm paksud ning küljepikkused vastavalt 135mm ja 250mm. Kõik katsekehad on mõlemalt poolt kaetud fooliumkattega. Tabelis (tabel 1) märgitud „Katse II“ osa veerus on igale katsekehale määratud selle peal läbiviidavad katsed. „Katse III“ etapp on kõigil katsekehadel sama.

Tabel 1: Katsekehade jaotus II ja III osa katsete tarbeks

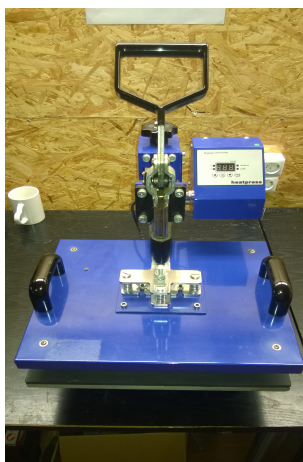
Katsekeha nimetus	Katse II osa	Katse III osa
Katsekeha A	Terve, survestatud 1MPa	5 külma tsükkel -20°C
Katsekeha B	Terve, survestatud 1MPa	5 külma tsükkel -20°C
Katsekeha C	Auk, survestatud 1MPa	5 külma tsükkel -20°C
Katsekeha D	Auk, survestatud 1MPa	5 külma tsükkel -20°C
Katsekeha E	Auk, teibitud	5 külma tsükkel -20°C
Katsekeha F	Auk, teibitud	5 külma tsükkel -20°C
Katsekeha G	Auk, ilma teipimata	5 külma tsükkel -20°C
Katsekeha H	Auk, ilma teipimata	5 külma tsükkel -20°C

Katsekehad on saadud Saksamaa ettevõttelt Porextherm Dämmstoffe GmbH. Kaheksa katsekeha on jagatud nelja erinevasse gruppi ning iga grupi jaoks on kaks identsete välisteguritega mõjutatud katsekeha.

4.2. Kasutatud seadmed/abivahendid

4.2.1. Kuumaplaat „HP3805B“

Selleks et saavutada ühtlane 200°C temperatuur laiema pinna ulatuses, kasutatakse kuumaplaati „HP3805B“ (joonis 1). Seadme kuumaplaadi pinnamõõdud on 280x370mm. Antud seadmega on võimalik kuumutada pinda maksimaalselt kuni 250°C. Katsekehade kuumutamine kõrge temperatuurini on vajalik selleks, et tekitada katsekeha kahel poolel suur temperatuuride erinevus. Seejärel on võimalik mõõta katsekeha kahe külje temperatuuride erinevust. Seadme suureks eeliseks antud katsete läbiviimisel on see, et kõigi katsete vältel on kuumaplaadi temperatuur väga ühtlane ning sellest lähtuvalt on võimalik saadud tulemusi ka objektiivselt analüüsida. Temperatuuri kõikumine 200°C juures on +/- 2°C.



Joonis 1: Kuumaplaat „HP3805B“ (Autori foto)

Katsete läbiviimiseks pööratakse seadme pealmine kuumaplaat tagurpidi, et oleks võimalik katsekehad koos mõõteplaadiga paigutada kuumaplaadile. Pildil on seade tavaolekus ning vajab enne katsete algust eelseadistamist.

4.2.2. Termokaamera „Milwaukee M12™“

Termokaamerat (joonis 2 ja 3) kasutatakse antud katsete puhul selleks, et vahetult peale kuumaplaadilt eemaldamist teha katsekehast pilt (vt LISA 6), mis näitaks detailsemalt, mis piirkonnas toimub kõige suurem temperatuuride muutus katsekehal.

Katsekehad eemaldatakse kuumaplaadilt ning asetatakse seejärel laua peale. Kõigil katsekehadel lastakse võrdselt jahtuda 30 sekundit ning seejärel mõõdetakse katsekeha temperatuur ning tehakse ka termopilt.



Joonis 2: Termokaamera Milwaukee M12 (Autori foto)



Joonis 3: Termokaamera Milwaukee M12 (Autori foto)

Antud termokaamera puhul on tegemist professionaalse kaameraga, mida kasutatakse ka hoonete energiaauditite koostamisel. Termokaamerat pakkus laenuks Milwaukee esindaja Eestis, kes oli heameelega nõus aitama kaasa lõputöö ühe etapi valmimisele.

4.2.3. Digitaalne nihik „Edwin Digital Caliper 150mm“

Digitaalset nihikut (joonis 4) kasutatakse antud katsetes selleks, et jälgida katsekehade paksuse kõikumist erinevate katsete käigus. Katsekehade mõõtmiseks on iga katsekeha peal märgitud kuus asukohta, mille järgi on võimalik iga kord mõõta katsekeha paksust täpselt samast kohast ning teostada hilisemat analüüsi materjali paksuse kõikumise kohta.

Katsekehade paksust mõõdetakse peale seda, kui termopildid on tehtud ning katsekeha temperatuurid on mõõdetud. Paksuste mõõtmise toimub 2 minuti jooksul alates sellest hetkest, kui katsekeha eemaldatakse kuumaplaadilt.



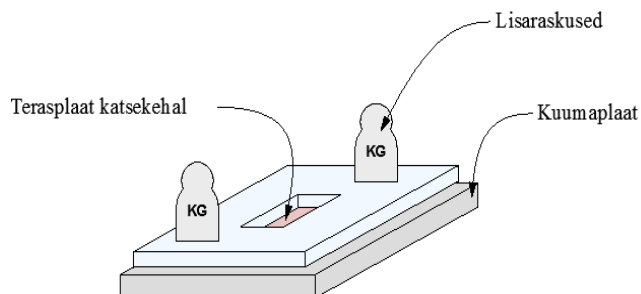
Joonis 4: Digitaalne nihik „Edwin Digital Caliper 150“ (Autori foto)

Antud nihikul on süsteem, mis võimaldab mõõta iga kord sarnase tugevusega, mis tähendab, et materjali kokkusurumine mõõtmise käigus on minimaalne. Antud digitaalse nihiku mõõtetäpsus on 0,01mm ning võimalik viga on +/-0,02mm.

4.2.4. Soojusisolaator „Super Isol“

Soojusisolaatorit Super Isol kasutatakse selleks, et vältida võimalikku soojuste levikut kuumaplaadilt otse katsekeha pealmisele pinnale. Selleks on soojustusplaadi keskele lõigatud ava mõõtudega 70x150mm. Soojustusplaat paigutatakse kuumaplaadi peal olevale katsekehale nii, et igast katsekeha äärest vähemalt 20mm on sellega kaetud. See tagab selle, et kuumaplaadilt tõusev soojus liigub mööda isolatsiooniplaati otse ruumi ning sellest lähtuvalt ei muuda ka katsetulemusi. Selleks, et isolatsiooniplaadi temperatuur mitmete katsete järel ei muutuks määravaks katsetulemuste mõjutamisel, siis tehakse järjest katseid kahe katsekehaga nii, et mõlema kuumatsükli jaoks keeratakse isolatsiooniplaadil teine pool. Peale seda lastakse isolatsiooniplaadil 15minutit jahtuda. Isolatsiooniplaadi enda temperatuuri vahemik katsete käigus on 24-26°C.

Selleks, et isolatsiooniplaat oleks tihedalt vastu katsekeha ning soojus ei pääseks otse katsekeha peale, on iga katse ajaks paigaldatud soojusisolatsiooni plaadi peale raskused, mis suruvad isolatsiooniplaadi ühtlaselt vastu katsekeha (joonis 5 ja 6).



Joonis 5: Super Isoli kasutamise põhimõte (Autori joonis)



Joonis 6: Soojusisolaator „Super Isol“ (Autori foto)

Isolatsiooniplaadi „Super Isol“ näol on tegemist spetsiaalse kuumakindla kaltsiumsilikaat plaadiga, mille peamine kasutusvaldkond on küttekehade ja kollete isoleerimine või ehitamine. Antud isolatsiooniplaadi sooja-erijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$] on $0,06\text{W/m}^{\circ}\text{K}$. Antud materjal talub temperatuuri kuni 1000°C .

4.3. Meetodi kirjeldus

Võrdlusmeetodit ei kasutata antud juhul sooja-erijuhtivuse [$\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$] absoluutväärtuste leidmiseks. Andmed absoluutväärtuste kohta saan varasemalt koostatud Kristjan Igasta

magistritööst (EMÜ 2011), kus leitud vaakumpaneeli sooja-erijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] plaadi keskosas oli võrdne tootja poolt väljatoodud väärtusega 0,007W/mK (Igasta, 2011: 42).

Võrdlusmeetodi esimeseks etapiks on mõõta kõigi kaheksa katsekeha temperatuuri pinna muutused. Selleks paigutatakse katsekehad ühe kaupa kuumaplaadile, mis on kuumutatud 200°C. Selleks, et vältida kuumuse levimist servadelt katsekeha pealmisele küljele asetatakse katsekeha peale Super Isoli plaadi, mille keskele on lõigatud ava 70x150mm. Selle ava sisse paigutatakse 2mm paksusega terasplaat, mille peale on märgitud üheksa punkti. Nende punktide pealt mõõdetakse lasertemperatuurimõõdikuga temperatuurid enne ja pärast katsekeha paigutamist kuumaplaadile.

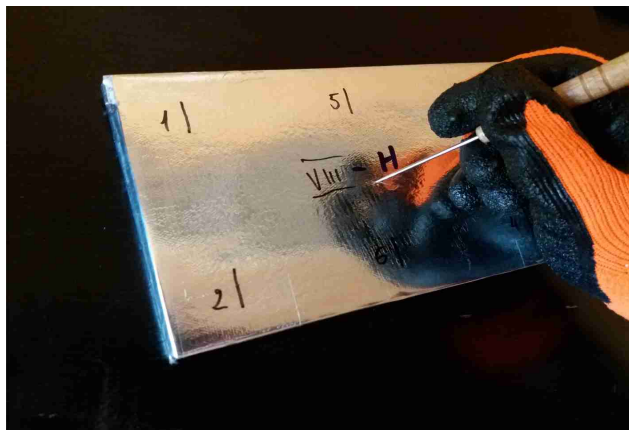
Samuti kasutatakse digitaalset nihikut selleks, et mõõta katsekehale märgitud asukohtadest katsekeha paksuseid, et näha, kas pidev kuumutamine ja jahutamine mõjutab katsekeha paksust. Enne katsetuste tegemist kaalutakse ka iga katsekeha digitaalse kaaluga. Seda infot kasutatakse selleks, et näha, kui palju muutub katsekeha kaal peale külmatsükleid ning niiskuse sissetõmbamist.

Katsekeha jääb kuumaplaadile (joonis 1) 200°C peale viieks minutiks. Peale seda võetakse katsekeha kuumaplaadilt ning paigutatakse laua peale, kus sellest tehakse termopilt Milwaukee M12 termokaameraga (joonis 2 ja 3). Peale seda mõõdetakse terasplaadil asuva üheksa punkti temperatuurid ning märgitakse need üles tabelisse. Samuti mõõdetakse katsekehal märgitud kohtadest katsekehade paksused ning kantakse tulemused tabelisse. Esimese etapi puhul tehakse sama tsükkel läbi kõigi kaheksa katsekehaga.

Teises etapis jagatakse kaheksa katsekeha nelja erinevasse gruppi. Esimesed kaks katsekeha jäävad terveks ning koormatakse koormusega 1MPa. Seejärel tehakse katsekehaga läbi terve tsükkel, mis tehti esimeses etapis. Mõõtmistulemused märgitakse taaskord tabelisse.

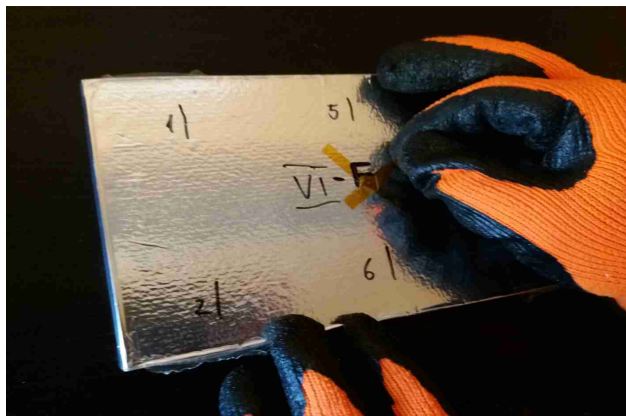
Tabelitesse kantud andmeid kontrollitakse ning jälgitakse, kas mõõtmiste käigus on selgunud tulemused, mis võrreldes teiste samaaegsete tulemustega on märgatavalt erinevad. Kui on oht, et tegemist on mõõteveaga, siis antud tulem eemaldatakse tabelist.

Teises grupis olevatel katsekehadel on pealmine kattekiht läbistatud (joonis 7) ning ühtlasi on see ka survestatud koormusega 1MPa. Katsekehadega tehakse taaskord läbi kogu mõõtmistsükkel.



Joonis 7: Katsekeha pealmise kihi läbistamine (foto Riin Leas)

Kolmandas grupis olevad katsekehad on samuti läbistatud pealiskihiga, aga kohe peale ava tekitamist kaeti see kuumakindla teibiga (joonis 8), et vältida jätkuvat õhu ja niiskuse ligipääsu katsekeha sisemusele. Katsete käigus kasutatakse kuumakindlat teipi, kuna see kannatab kõrgel temperatuuril kuumutamist ilma, et see üles sulaks. Antud katsekehasid ei ole survestatud. Taaskord tehakse läbi kogu katsetsükkel.



Joonis 8: Katsekehasse tekitatud augu teipimine (foto Riin Leas)

Neljandas grupis on katsekehad, mis on samuti läbistatud pealiskihiga ning mida ei ole survestatud. Nendega tehakse läbi kogu katsetsükkel. Kolmandas etapis võetakse kõik 8 katsekeha ning paigutatakse need külmakambrisse -20°C juurde. 3 päeva jooksul tehakse 5 külmatsükli.

Pärast külmatsükleid mõõdetakse taaskord kõigi katsekehade kaalud ning paksused. Seejärel alustatakse kogu temperatuuride mõõtmise tsükleid algusest kõigi kaheksa katsekehaga. Saadud tulemused kantakse kõik tabelisse.

Saadud tulemusi saab võrrelda selleks, et näha, kui palju mõjutavad erinevad välistegurid vaakumsoojustuspaneelide sooja-erijuhtivust [$\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$] ning kas avade vahetust katmisest on ka reaalselt kasu.

5. KATSETULEMUSED

5.1. Katse I etapp

I etapi katsetulemuste analüüsimise eesmärgiks on määrata ära suhe temperatuuri muutuse ja vaakumsoojustuspaneeli sooja-erijuhtivuse $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ vahel. Selleks kasutatakse tabelitesse kantud temperatuuride (vt LISA nr 1) erinevust enne ja pärast kuumutamist.

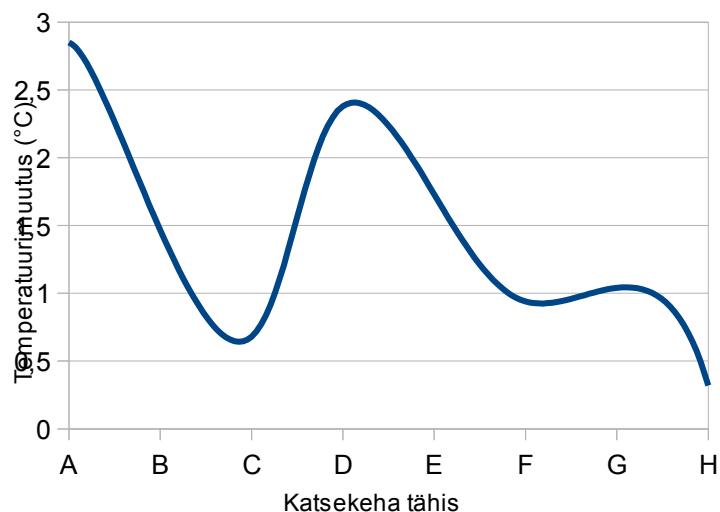
Paralleelselt mõõdetakse kuumutamiste järel ka materjali paksuse muutust, mis on samuti kantud tabelisse (vt LISA nr 2) ning antud andmetest saab teha järeldusi materjali käitumise kohta kõrgetel temperatuuridel. Kuna katsekeha A positsioonid 1, 2 ja 8 on ülejäänud mõõdetud temperatuuride suhtes drastiliselt erinevad, siis võib eeldada, et nende puhul seisneb viga temperatuuri ligipääsus otse kuumaplaadilt mõõteplaadile. Sellest lähtuvalt ei kasutata neid ka algnäitude leidmiseks.

A katsekehal kujuneb keskmiseks temperatuuride tõusuks peale viie-minutilist soojendamist kuumaplaadil $2,85^{\circ}\text{C}$. B- ja C- katsekehal ei esine temperatuuride mõõtmisel anomaaliaid ning sellest lähtuvalt võib nende katsekehade tulemused kõik arvestada otseselt algnäidu leidmiseks. B- katsekeha keskmine temperatuuri tõus terve mõõteplaadi ulatuses on $1,46^{\circ}\text{C}$. C- katsekeha keskmine temperatuuri tõus terve mõõteplaadi ulatuses on $0,68^{\circ}\text{C}$. D- katsekeha keskmine temperatuuride tõus terve mõõteplaadi ulatuses on $2,38^{\circ}\text{C}$.

Katsekeha E puhul algnäidu leidmiseks ei kasuta mõõdetud positsioonide 8 ja 9 väärtuseid, mille kohta võib väita, et ligi on pääsenud soojust, mis liikus üles katsekeha külgedelt.

E- katsekeha keskmine temperatuuride tõus terve mõõteplaadi ulatuses on $1,73^{\circ}\text{C}$. F- katse- keha keskmine temperatuuride tõus terve mõõteplaadi ulatuses on $0,94^{\circ}\text{C}$. G-

katsekeha keskmine temperatuuride tõus terve mõõteplaadi ulatuses on $1,04^{\circ}\text{C}$. H-katsekeha keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadi ulatuses on $0,32^{\circ}\text{C}$. Katsekehade F, G ja H temperatuurimuutused (joonis 9) olid väga ühtlased ning võib eeldada, et anomaaliaid, mida ei võiks arvestada algnäidu leidmiseks, ei leidu.



Joonis 9: Katsekehade temperatuuride muutus algandmete leidmisel peale viit minutit kuumutamist 200°C juures

Tänu saadud andmete suhteliselt sarnasele mõõtevahemikule võib eeldada, et saadud tulemused on tõesed ning neid saab kasutada algnäidu leidmiseks. Saadud mõõtetulemuste väikene vahemik viitab ka sellele, et kõik paneelid on katse alguses võrdsete sooja-erijuhtivuse [$\lambda(\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K})$] omadustega.

5.2. Algnäidu leidmine

Tabelitest (vt LISA 1) on näha, et temperatuuri tõus erinevates mõõtepunktides on sarnane. Sellest lähtuvalt võib väita, et neid andmeid kasutades leitakse algnäit, mille väärtus on võrdne vaakumsoojustuspaneeli sooja-erijuhtivusega $0,007\text{W}/(\text{m}^{\circ}\text{K})$. Lähtudes sellest eeldusest, saadakse hakata jälgima vaakumsoojustuspaneeli soojusjuhtivusomaduste muutust vastavalt erinevatele välismõjutustele, millest kõige ohtlikum on paneeli kesta läbistamine.

Algnäit leitakse aritmeetilise keskmise abil, kust on välja arvatud need väärtused, kus on alust arvata, et tegemist on olnud kas mõõteveaga või ebapiisava soojuse isoleerimisega. Võimalikud mõõtevead võivad tekkida nii soojuse ligipääsust katsekeha mõõdetavale poolele kui ka inimlikust veast.

Kasutades antud väidet leian algnäidu:

$$2,3+3,6+2,9+2,5+3,2+2,6+2,3+2,2+0,1+1,5+1,7+1,8+0,1+2,6+0,9+0+0,7+1,1+0,6+1,2+1+0,2+0,5+0,8+2,3+0,5+1,2+3,6+2,9+2,7+2,1+3,1+3,1+2,6+2,2+0,9+2,4+2,4+3,9+1,4+0,7+1,3+0,7+0,5+0,4+0,6+0,4+1,7+0,9+0,1+0,7+1+1,4+0,2+0,8+1,9+1,7+1,6+0,7+0,5+0,1+0,5+0,5+0,3+0,4+0,2+0,2=93,7$$

$$93,7/67=1,39^{\circ}\text{C}.$$

Siit saadakse teha järeldus ning ühtlasi ka eelduse, et $0,007(\text{W/m}^{\circ}\text{K}) = 1,39^{\circ}\text{C}$. See tähendab, et terve ning puutumata vaakussoojustuspaneeli temperatuuri muutus teisel pool mõõteplaati on $1,39^{\circ}\text{C}$.

5.3. I etapi materjali paksuste võrdlemine

Paralleelselt materjali temperatuuride mõõtmisega mõõdeti ka kuumutamisele eelnevalt ning järgnevalt materjali paksust kuuest märgitud positsioonist, et jälgida materjali käitumist kuumusest tingituna.

Esmased tulemused tervete ning puutumata vaakumsoojustuspaneelide paksuste muutuse kohta kuumutamisel näitavad, et terve plaadi puhul ei ole üheseid kindlaid muutuseid märgata. Tulemused varieeruvad paksenemise ja õhenemise vahel maksimaalselt 0,57mm ulatuses. Antud omadus tsiviilehituses ei mängi olulist rolli kuna temperatuuride erinevused ei tõuse nii kõrgele. Küll aga tööstuses ja kosmosetehnoloogias tagab nii väikene paksuse muutus selle, et projekteerimisel ei pea arvestama olulise deformatsiooniruumiga ning see lihtsustab konstruktsiooni valmistamist.

5.4. I etapi eeldused ja järeldused

Peale esmaseid katseid, mille abil määratakse ära materjali nii-öelda tavaolek, saadakse teada seda, et kui jätta välja statistiliselt olulised ebakõlad mõnes üksikus punktis, on tegemist ääretult ühtlase materjaliga ning temperatuuride erinevus materjali erinevates punktides on maksimaalselt 3,9°C. Kõik katsekehad andsid väga sarnaseid tulemusi ning sellest lähtuvalt võidakse saadud algnäitu kasutada eeldusena, millest lähtuda II ja III katseetapis. Materjali paksuste muutumisel saadud tulemused ei andnud päris üheselt mõistetavaid tulemusi, kuna olenevalt katsekehast ja mõõtepunktist varieerusid paksenemise ja kahanemise vahel maksimaalselt 0,57mm ulatuses. Muutused olid liialt suured selleks, et teha mingeid konkreetseid järeldusi.

6. Katse II etapp

II etapi peamiseks eesmärgiks on kontrollida, kuidas käitub antud materjal sellisel juhul, kui tehtud auk kohe kaetakse ning õhku ja niiskust sisse rohkem ei lasta. Arvestades materjali omadust, et vaakumkeskkonna lõhkumisel muutub materjal tolmlavaks pulbriks, siis võib eeldada, et kui tehtud auk kohe, ilma et paneeli oleks vahepeal deformeeritud, suudab ise isoleerida tekkinud augu ning sooja-erijuhtivuse omadused oluliselt ei muutu. Kuna vaakumsoojustuspaneelis olev ränioksiid koosneb põhimõtteliselt klaasikeradest, mis on vaakumkeskkonnas väga tihedalt surutud teineteise vastu, siis need kerakesed ise õhku ega niiskust läbi ei lase nii kaua kuni nende vahele ei ole pääsenud õhku. Ühesõnaga võidakse eeldada, et peale väikese augu tegemist, ning kohest katmist teibiga, jääb paneeli üldine vaakumkeskkond püsima just tänu tugevalt kokkusurutud klaasikerakestele ning soojusomadused märgatavalt ei muutu. Katseetapi II osas võrreldakse saadud temperatuuride erinevusi (tabel 3) katseetapis I saadud temperatuuri erinevustega (vt LISA 1).

Tabel 2: Katsekeha A – II etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp.erinevus
Pos 1	25,6	28,1	2,5
Pos 2	25,2	27,5	2,3
Pos 3	24,9	27,1	2,2
Pos 4	25,1	28,4	3,3
Pos 5	24,6	26,8	2,2
Pos 6	25,8	29,4	3,6
Pos 7	26,1	29,3	3,3
Pos 8	25,7	28,2	2,5
Pos 9	24,9	26,8	1,9

Katsekeha A puhul tuleb II etapi keskmiseks temperatuuritõusuks $2,64^{\circ}\text{C}$. Algandmete mõõtmisel saadud plaadi keskmine temperatuuritõus oli A- katsekehal $2,84^{\circ}\text{C}$, mis tähendab, et 1MPa juures survestamine ei mõjuta kuidagi materjali sooja-erijuhtivusele

$[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$. II katseetapi puhul saadi temperatuuri vaheks hoopis $0,2^\circ\text{C}$ vähem, kui seda tuli algandmeid leides. Antud erinevus võib tulla sellest, et kuna A- katsekeha algandmeid uurides oli mõõtetulemustest näha, et teatud punktidele pääses soojus ligi ümber mõõteplaadi ja võib eeldada, et sama soojus tõstis keskmiselt ka plaadi enda temperatuuri.

B- katsekeha keskmiseks temperatuuritõusuks mõõteplaadi ulatuses mõõdeti $1,47^\circ\text{C}$. Algandmeid koostades oli sama katsekeha temperatuuri tõus teisel pool mõõteplaati $1,46^\circ\text{C}$, mis kinnitab seda, et 1MPa koormus ei mõjuta mingil määral katsekeha sooja-erijuhtivust $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$.

Ehkki mõlema katsekeha puhul on peale koormamist saadud temperatuuride erinevus kahelpool katsekeha isegi väiksem, siis pole alust arvata, et surveastamine peaks antud materjali sooja-erijuhtivust $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ parandama, pigem võib selle lugeda mõõtmisveaks.

C- katsekeha keskmine temperatuuride erinevus peale kuumaplaaditsüklit on $4,37^\circ\text{C}$. Sama katsekeha temperatuuride erinevus algnäite leides oli $0,68^\circ\text{C}$. Antud katsekeha puhul on enne ja pärast pealiskihi läbistamist temperatuuride erinevus 6,42 kordne. See tähendab, et selle plaadi ulatuses on katsekeha sooja-erijuhtivus $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ tõusnud algse $0,007(\text{W/m}^*\text{K})$ pealt $0,0448(\text{W/m}^*\text{K})$ peale, mis on juba oluliselt nõrgem näitaja kui kivivillal.

D katsekeha puhul saadi keskmiseks temperatuuride tõusuks mõõteplaadi teisel poolel $3,57^\circ\text{C}$. Algnäidu leidmisel oli sama katsekeha temperatuuride erinevuseks kahelpool mõõteplaati $2,38^\circ\text{C}$. See teeb temperatuuride erinevuseks 1,5 korda.

E- katsekeha keskmine temperatuuride erinevus mõõteplaadi kahel küljel on $1,85^\circ\text{C}$. Sama katsekeha temperatuuride erinevus kahel pool mõõteplaati algnäite leides oli $1,73^\circ\text{C}$. Enne ja pärast pealiskihi lõhkumist, (kui auk kohe katta kuumakindla teibiga) on temperatuuride erinevuse muutus väike, erinevus on 1,06 kordne. Antud plaadi puhul tähendaks see seda, et sooja-erijuhtivus $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ oleks $0,007(\text{W/m}^*\text{K})$ asemel $0,00742(\text{W/m}^*\text{K})$.

F- katsekeha keskmine temperatuuri tõus mõõteplaadil oli 1,08°C. Algnäidu leidmisel oli sama katsekeha keskmine temperatuuri tõus 0,94°C, mis tähendab, et sooja-erijuhtivus $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ suurenes 1,14 korda.

Kahe läbistatud kattekihiga katsekeha, mille auk kaeti koheselt teibiga, keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadil oli 1,46°C, mis on ainult 0,07°C kõrgem kõigi kaheksa katsekeha keskmisest temperatuuride tõusust enne plaatide lõhkumist. Keskmine temperatuuri tõus võrreldes samade katsekehadega oli veidi kõrgem ehk 0,13°C.

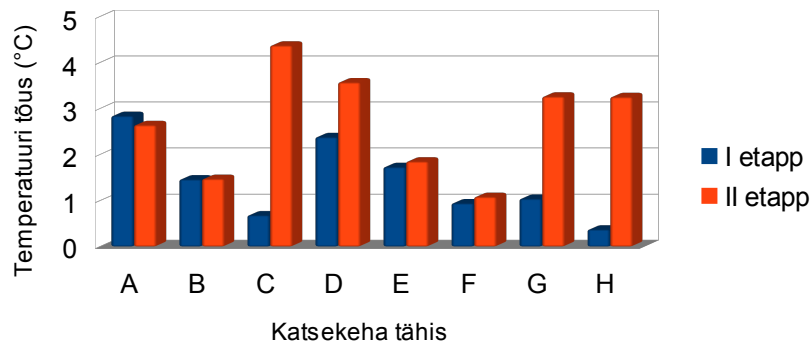
G- katsekeha keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadil on 3,26°C. Sama katsekeha algnäidu leidmisel oli temperatuuride keskmine erinevus 1,04°C, mis oli 3,13 korda madalam, kui juba vigastatud katsekehal. Sellest lähtudes saadakse antud plaadi sooja-erijuhtivuseks $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ 0,007(W/m*K) asemel 0,0219(W/m*K), mis on võrdne SPU sooja-erijuhtivusega $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$, mille väärtuseks loetakse 0,023-0,027(W/m*K). („Kingspan Therma isolatsioonimaterjalide tehnilised omadused“, 2017)

H- katsekeha keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadil on 3,25°C. Sama katsekeha temperatuuride tõus mõõteplaadil, kui leiti algnäite, oli 0,37°C. Seega on peale pealiskesta lõhkumist suurenenud antud plaadi sooja-erijuhtivus $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ 8,7 korda, mis teeb antud plaadi sooja-erijuhtivuseks $[\lambda(\text{W/m}^*\text{K})]$ 0,061(W/m*K), mis on peaaegu kaks korda suurem kui kivivillal.

6.1. Katse II etapi järeldused

Katse II etapi mõõtmistulemused kinnitasid katse alguses püstitatud hüpoteesi, et lõhutud pealiskestaga katsekehad, mille vigastatud osa on koheselt kaetud, ei kaota oluliselt oma soojapidavusomadusi. Katsekeha E temperatuuride tõus mõõteplaadil oli enne augu tegemist 1,73°C ning peale augu tegemist ja selle katmist kuumakindla teibiga oli temperatuuri tõus 1,85°C. Katsekeha F temperatuuride tõus oli enne augu tegemist 1,08°C ja pärast augu tegemist ning katmist kuumakindla teibiga 0,94°C.

E- ja F- katsekeha keskmine temperatuuride tõus oli $1,46^{\circ}\text{C}$, mis tähendab, et nende plaatide sooja-erijuhtivus $[\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})]$ tõusis 1,06 korda ehk $0,00742(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$. Kuna antud sooja-erijuhtivuse $[\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})]$ muutus on äärmiselt väike, siis võidakse antud katsekehad lugeda võrdseks esialgsete katsekehadega. See tähendab, et kui ehituse käigus juhtub, et plaadi sisse tekitatakse mõni auk, siis õigesti käitudes on võimalik antud plaadi füüsikalised omadused säilitada ning pole põhjust karta, et plaat on muutunud kasutuskõlbmatuks. Küll aga, kui on peale augu tegemist plaati liiga palju muljutud ja liigutatud ning on visuaalselt näha, et kattekiht ei ole enam tihedalt ümber paneeli sisu, siis tuleb lugeda katsekeha kasutuskõlbmatuks nagu juhtus katsekehadega C, D, G ja H (joonis 10).



Joonis 10: I ja II etapi temperatuuride tõusu võrdlus

Antud katsekehade temperatuuride keskmine erinevus võrreldes tervete katsekehadega on 4,9 kordne, mis teeks nende katsekehade sooja-erijuhtivuseks $[\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})]$ $0,034(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$. See sooja-erijuhtivus $[\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})]$ on aga võrdne kivivillaga, mis tähendab, et antud juhul on katsekehad muutunud täies ulatuses kasutuskõlbmatuks.

Antud tulemused näitavad, et ehkki tegemist on tundliku materjaliga, mis ei talu mehaanilist vigastamist, siis teatud tingimustel on väiksemate mehaaniliste vigastustega paneeli võimalik siiski edasi kasutada.

7. Katse III etapp

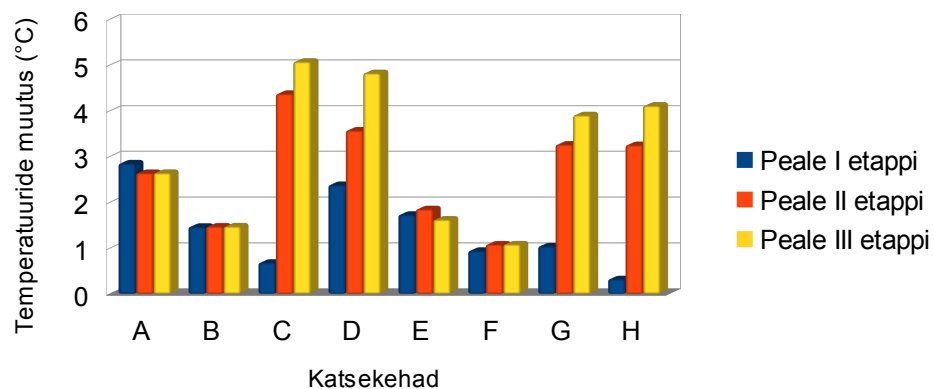
Katse III etapis võetakse samad kaheksa katsekeha ning on enne uute mõõtekatsete tegemist paigutatud külmakambrisse, kus need läbisid kolme päeva jooksul viis erineva pikkusega külmatsüklit. Ajal, mil katsekehad ei olnud külmakambris olid nad paigutatud eluruumidesse, mille keskmine temperatuur oli 22°C ning õhuniiskus 60%. Katse III etapi eesmärk on näha, kui palju mõjutab külmatsüklite tagajärjel katsekehasse imbunud niiskus katsekehade sooja-erijuhtivust [$\lambda(\text{W/m}\cdot\text{K})$]. Külmakambrisse paigutati ainult need katsekehad, mis olid lõhutud pealiskihiga. Esimesed kaks katsekeha katse III etappi ei läbi, kuna nendes ei toimu mingeid muutusi.

C- katsekeha keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadil on 5,07°C. Katse II etapis oli sama katsekeha keskmine temperatuuride erinevus 4,37°C. See tähendab, et külmatsüklite ja sellest põhjustatud niiskustaseme tõus materjalis vähendas materjali soojapidavust järgmised 16%. Antud muutus on eeldatust väiksem, aga selle põhjuseks võib olla ka augu suurus, mis nii väheste tsüklite käigus ei pruugi olla piisav selleks, et imada sisse märgatavat kogust õhuniiskust.

D- katsekeha temperatuuride tõus mõõteplaadil on 4,82°C. Sama katsekeha temperatuuride erinevus katse II etapis oli 3,57°C. Antud katsekeha puhul põhjustab niiskuse tungimine katsekeha sisemusse sooja-erijuhtivuse [$\lambda(\text{W/m}\cdot\text{K})$] langust koguni 37%.

E- katsekeha temperatuuride keskmine tõus mõõteplaadil on 1,62°C. Katse II etapis tuli antud katsekehal temperatuuride erinevuseks 1,85°C. Jooniselt (joonis 11) on näha, et katsekeha puhul on peale külmatsükleid temperatuuride erinevus küll väiksem, aga kuna vahe on väike ja puudub loogiline põhjus, miks külmatsüklid peaksid parandama soojapidavusomadusi, siis võib eeldada, et pigem on tegemist mõõtmisveaga.

F- katsekeha keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadil on $1,08^{\circ}\text{C}$. Sama katsekeha II katse etapis tehtud katsed andsid temperatuuride erinevuseks täpselt sama tulemuse, mis III etapis – $1,08^{\circ}\text{C}$. E- ja F- katsekeha mõõtmistulemusi vaadeldes (joonis11) võib järeldada, et katsekehad, mille vigastatud kohad on koheselt kaetud kuumakindla teibiga, ei ima endasse mingil määral õhuniiskust ning külmatsüklite tagajärjel ei toimu ka muutusi katsekehade sooja-erijuhtivuses [$\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$].



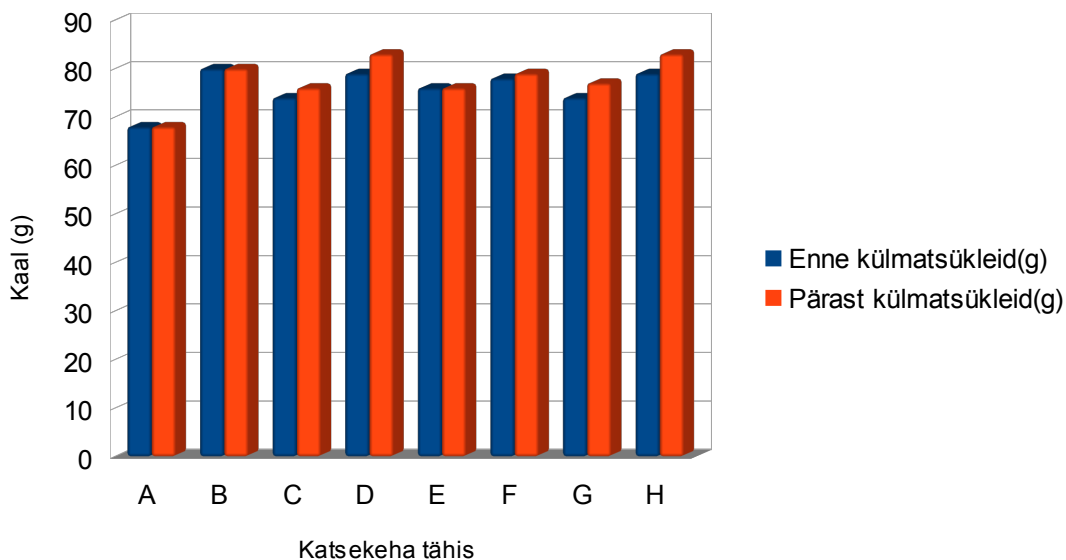
Joonis 11: Mõõteplaadi temperatuuride muutus erinevates katseetappides

G- katsekeha keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadil on $3,9^{\circ}\text{C}$. Sama katsekeha tulemus II katse etapis oli $3,26^{\circ}\text{C}$, mis tähendab, et peale õhuniiskuse ligipääsu on paneeli sooja-erijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$] suurenenud 19%. H- katsekeha keskmine temperatuuride tõus mõõteplaadil on $4,11^{\circ}\text{C}$. Sama katsekeha temperatuuride erinevus katse II etapis oli $3,25^{\circ}\text{C}$, mis tähendab, et peale niiskuse ligipääsu on paneeli sooja-erijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^{\circ}\text{K})$] suurenenud 26%.

7.1. Kaalumuutus peale külmatsükleid

Selleks, et välja selgitada, kui palju erinevad katsekehad peale külmatsükleid niiskust sisse tõmbavad, kaaluti katsekehasid vahetult enne külmakambrisse panemist ning vahetult

peale viimast külmatsükli. Katsekehade A ja B kaalud on joonisele (joonis 12) lisatud võrdluseks teiste katsekehade kaaludega. Need katsekehad ei läbinud külmatsükleid.



Joonis 12: Katsekehade kaalutõus peale külmatsükleid

Katsekehade C ja D kaalud tõusid külmatsükli järel vastavalt 2g ja 4g. See tähendab, et protsentuaalselt moodustas paneeli sisemusest õhuniiskus vastavalt 2,6% ja 4,8%. Mõlema paneeli sooja-erijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] suurenes vastavalt 17% ja 35%, mis otsese seoses ka suhtelise niiskussisaldusega paneelis.

Katsekehade E ja F kaalu tõus oli väike (vastavalt 0g ja 1g), mis tähendab, et katsekehade kaal oli ligilähedane algkaaluga. See tähendab, et protsentuaalselt moodustas paneeli sisemusest õhuniiskus vastavalt 0% ja 1,2%. Antud 1 grammiline tõus katsekeha F puhul on suure tõenäosusega tingitud sellest, et kaal oli 1g täpsusega ning ühel juhul ümardas ta numbri suuremaks ning teisel juhul väiksemaks.

Katsekehade G ja H kaalud tõusid külmatsükli järel vastavalt 3g ja 4g. See tähendab, et protsentuaalselt moodustab õhuniiskus paneelides sisust vastavalt 3,8% ja 4,8%. Antud niiskuse sisaldus on proportsionaalses suhtes katsekehade sooja-erijuhtivuse [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] suurenemisega, kus katse III etapis leitud katsekeha G sooja-erijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] suurenes 19% ning katsekehal H suurenes sooja-erijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] 26%.

7.2. Katse III etapi järeldused

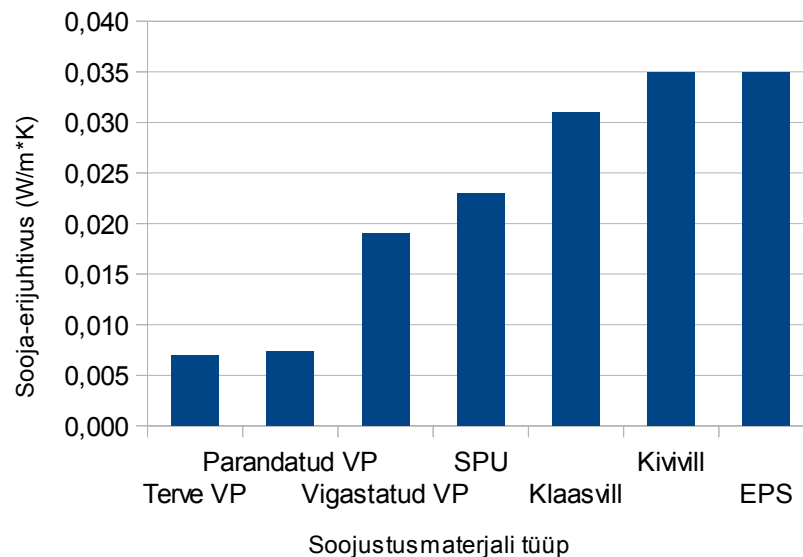
Katse III etapp näitas seda, et katsekehad, mille vigastatud osad olid parandamata, kaotasid külmatsükli tagajärjel sissetõmmatud õhuniiskuse tõttu märgatavalt oma soojapidavusomadusi. Kaalu järgi imasid kõige enam õhuniiskust sisse katsekehad D ja H, mille kumbagi kaalud tõusid 4g. Katsekehad C ja E imasid sisse vastavalt 2 ja 3 grammi ning katsekeha F näitas 1g suurust kaalumuutust. Viimast muutust võib aga pidada kaalumisel tekkinud veaks, kuna antud katsekeha oli vigastatud koha pealt suletud, siis ei oleks tohtinud sinna mingil määral õhuniiskust sisse pääseda, mis võiks kaalu tõsta. Katsekehad A ja B, mis oli täielikult puutumata, ei läbinud III katsevooru, kuna nende puhul ei olnud oodata tulemusi, mis võiks anda uut infot.

Antud katse III etapp tõestas, et tekkinud aukude katmine katsekehal aitab oluliselt takistada lisaks õhu ligipääsule ka niiskuse ligipääsu. Hoides aga niiskust eemal, on võimalik takistada juba niigi kahjustunud plaadil kuni 26%-list sooja-erijuhtivuse [$\lambda(W/m \cdot K)$] tõusu. Kui lisada sinna ka õhu ligipääs katsekehale, siis on tulemused juba oluliselt suuremad.

Ehituspoodidest on võimalik leida väga erinevaid soojustusmaterjale, mille kõigi sooja-erijuhtivuse [$\lambda(W/m \cdot K)$] näitajad on suhteliselt sarnased. Isegi vigastatud vaakumsoojustuspaneel jääb oma näitajate poolest traditsiooniliste soojustusmaterjalidega samasse suurusjärku. Kuid võttes arvesse vaakumsoojustuspaneeli hinda, siis ei ole vigastatud paneeli kasutamine enam otstarbekas. Samas terve vaakumsoojustuspaneeli ja parandatud vaakumsoojustuspaneeli sooja-erijuhtivus [$\lambda(W/m \cdot K)$] on suurusjärgu jagu väiksem teistest laialdaselt kasutusel olevatest ehitusmaterjalidest (joonis 13).

Selleks, et veelgi parandada vigastatud vaakumsoojustuspaneelide soojapidavusomadusi, tuleks välja töötada spetsiaalne mastiks, millega paneelid katta. Mastiks oma olemuselt peaks olema piisavalt viskoosne ja samas vedel, et samaaegselt kruvi tungimisega paneeli liigub kaasa ka mastiks, mis samaaegselt sulgeks ava uuesti õhukindlalt. Piisava tiheduse ja

viskoossusega mastiks aitab tekkinud augu ette liigutada ka see, et paneelis olev alarõhk tõmbab mastiksi tekkinud avale ette. Antud mastiks võiks olla juba tehases kantud paneeli pinnale ning see aitaks oluliselt vähendada vigastada saanud paneelide sooja-erijuhtivuse [$\lambda(\text{W/m}^2\text{K})$] vähenemist. Alternatiivina võiks tegemist olla objektile peale kantava tootega, mida määratakse piirkondadele, kus on teada, et tuleb vaakumsoojustuspaneel läbistada.



Joonis 13: Ehitusmaterjalide sooja-erijuhtivuse võrdlus

Selleks, et vaakumsoojustuspaneel oleks võimeline konkureerima teiste traditsiooniliste soojustusmaterjalidega tuleb pakkuda ehitajale alternatiive olukordadeks, kus paneeli vigastused on tõenäolised või kus nende vältimine on võimatu. Peale seda oleks võimalik antud materjali kasutamine ka tsiviilehituses.

8. Kokkuvõte

Vaakumsoojustuspaneeli puhul on tegemist perspektiivika tootega ning ei ole kahtlust, et lähimatel kümnenditel saab sellest igapäevaselt kasutatav soojustusmaterjal. Paneeli soojaerijuhtivus [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] on kõigi teiste laialdaselt kasutusel olevate materjalidega võrreldes peaaegu kümme korda madalam ning see annab võimaluse kasutada seda materjali just sellistes kohtades, kus kõik klassikalised lahendused jäävad hätta. Näiteks stukkdekooriga ja karniisidega muinsuskaitsealuste hoonete juures. Selleks aga, et tuua see materjal kasutusele ka tsiviilehituses, tuleks lahendada mõned probleemid, mis inimesi selle paneeli juures võivad hirmutada. Lisaks hinnale on selleks ka just selles magistritöös uuritud omaduste muutumine vigastuse tagajärjel.

Antud uurimustöös näidatakse, et vigastatud paneelid kaotavad oluliselt oma soojapidavusomadusi, aga samaaegselt tõestas see, et õigesti käitudes on võimalik tekkinud viga minimaliseerida ning ka vigastatud paneele on teatud tingimustel võimalik kasutada. Õigesti käitumine tähendab siinkohal seda, et kui katsekehasse tekivad väikesed augud, mis läbistavad pealmise kattekihi, siis mingil juhul ei tohi seda paneeli hakata ülearu liigutama või muljuma, selle tagajärjel hakkavad ränioksiidi osakesed paneeli sisemuses liikuma ning õhk pääseb nende vahel liikuma. Sellisel juhul muutub paneel täies ulatuses kasutuskõlbmatuks. Kui aga jätta paneel puutumata ning esimesel võimalusel katta tekkinud ava mõne õhu- ja ilmastikukindla teibi või liimiga (nt hästi nakkuv aurutõkketeip), siis ei pääse praktiliselt mingil määral õhku ega niiskust paneeli sisemusse. Peale augu sulgemist on paneeli võimalik taaskord liigutada ning muljumine ei põhjusta paneeli sisemuse laialivalgumist. Selles uurimustöös kasutati aukude katmiseks kuumakindlat teipi põhjusel, et see on ainus teip, mis kannatab kuumutamist 200°C . Reaalses konstruktsioonis see ei sobiks, kuna see ei ole mõeldud välitingimustes kasutamiseks.

Katse I etapis sai leiti algandmed, mille alusel oli võimalik minna edasi katse järgmiste etappidega. I etapis tehti järeldus, et paneeli algne soojapidavus $0,007(\text{W/m}^*\text{K})$ on võrdne

kaheksa katsekeha keskmise temperatuuride erinevusega peale viie minutilist kuumutamist 200°C juures. Selle tulemusena saadakse paneeli normaalseks temperatuuride erinevuseks 1,37°C, mis on antud juhul võrdne 0,007(W/m*K).

Katse II etapis alustatud paneelide vigastamine ning teatud katsekehade puhul ka parandamine andis võimaluse võrrelda neid tulemusi algandmetega, et näha, kui palju suureneb temperatuuride erinevus peale õhu ligipääsu. Eeldati, et lahtiste aukudega katsekehade sooja-erijuhtivus [λ (W/m*K)] suureneb märgatavalt. Katsed näitasid, et muutus oli kuni 8,7-kordne, mis teeb paneeli sooja-erijuhtivuseks [λ (W/m*K)] 0,0609(W/m*K). Samas näitas katse II etapp ka seda, et üksiku augu tegemine, ning seejärel selle katmine õhukindlalt ei muuda arvestatavalt paneeli soojapidavusomadusi. Katsete järgi tuli tulemuseks, et temperatuuride erinevus II etapis oli võrreldes I etapiga natukene väiksem. Seda peab küll lugema mõõtmisveaks, sest pole põhjust eeldada, et II etapi tulemused võiksid olla paremad, kui I etapis, küll aga võivad tulemused olla samad.

Katse III etapis võeti kõik aukudega katsekehad ning pandi külmakambrisse, kus tehti viis erineva pikkusega külmatsükli, mille tagajärjel katmata aukudega katsekehad imesid vaakumi abil endasse veel lisa õhuniiskust, mis omakorda suurendas II etapiga võrreldes sooja-erijuhtivust [λ (W/m*K)] kuni 26%. Katsekehad, mille augud olid kaetud õhutihedalt, ei näidanud mingit muutust II ja III katse etapi vahel.

Sooritatud katsed näitasid, et vaakumsoojustuspaneelid on töökindlamad, kui seda alguses eeldati. Loodetavasti annab antud teadmine rohkem julgust seda materjali kasutada ka tsiviilehituses, kus õhukeste kõrgtehnoloogiliste soojustusmaterjalide kasutamine võib kitsastes ehitustingimustes olla varsti ainukene lahendus.

Kahjuks oli katsekehasid liiga vähe, et saaks teha absoluutseid järeldusi, sest vähene katsekehade arv annab suure võimaluse anomaaliate tekkeks. Kuna aga kõik eeldused oli sarnased katsetulemustega, siis võib väita, et saadud tulemused on tugevaks orientiiriks, et liikuda edasi ka teiste võimalike sarnaste katsetega.

Selleks, et veelgi suurendada vaakumsoojustuspaneelide vastupidavust ning potentsiaalselt ka nende kasutamist, oleks vajalik töötada välja mastiks, mis kantakse

vaakumsoojustuspaneeli pinnale ning selle eesmärk on kruvi või naela tungimisel paneeli sulgeda tekkinud auk. Tegemist peaks olema üheaegsel piisavalt viskoosse ja samas ka nakkuva mastiksiga, mida on võimalik kanda paneelile ka objektile või ka juba tehases. Mastiksit aitaks tekkinud avasse liigutada ka paneelis olev alarõhk, mis üritab esimese asjana tõmmata sisse väliskeskkonnas olevat gaasi või materjali. Praegusel juhul teadaolevalt sellist mastiksit ei ole välja töötatud, aga selle olemasolu võiks oluliselt suurendada vaakumsoojustuspaneelide levikut tsiviilehituses.

Kasutatud kirjandus

1. **Binz, A., Brunner, S., Bundi, R., Cauberg, H., Erb, M., Fregan, F., Ghazi, K., Heinemann, U., Johanneson, G., Moosmann, A., Nussbaumer, B., Schonhardt, U., Schwab H., Simmler, H., Steinke, G., Tenpierik, M., Thorsell, T.** (2005). Vacuum Insulation in the Building Sector, lk. 7-8.
http://www.ecbcs.org/docs/Annex_39_Report_Subtask-B.pdf
2. **Rafelski, J., Müller, B.** (1985). The Structured Vacuum – Thinking About Nothing. Saksamaa. H. Deutsch
3. Dictionary of Chemistry. (2004). Suurbritannia: Oxford University Press.
_(2017)
4. „Heat Transfer“. (2017). 03.15.2017, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/heatra.html>
5. Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. (vastu võetud 03.06.2015, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 03.03.2017). –*Riigi Teataja*
<https://www.riigiteataja.ee/akt/128022017002> (06.03.2017).
6. **Hubbard, A.T.** (2006). *Encyclopedia of Surface and Colloid Science*. Ameerika Ühendriigid: CRC Press.
7. **Igasta, K.** (2011). Vaakumsoojustuspaneeli uurimine. (magistritöö). Eesi Maaülikool Metsandus- ja maaehitusinstituut Maaehituse osakond. Tartu, Eesti.
8. **Incropera, F. P., Dewitt, D. P., Bergmann, T. L., Lavine, A. S.** (2011). Fundamentals of Heat and Mass Transfer seventh edition. Ameerika Ühendriigid. John Wiley & Sons, Inc.
9. **Johansson, P.** (2012). Vacuum Insulation Panels in Buildings. (Doktoritöö). Chalmers University Of Technology Department of Civil and Environmental Engineering . Göteborg, Sweden.
10. **Kingspan Therma isolatsioonimaterjalide tehnilised omadused.** (2017). 24.04.2017, <http://www.kingspansoojustus.ee/projekteerimine/tehnilised-omadused/>
11. Kliimamuutus – Euroopa võimalus. – Euroopa Ühenduste Komisjon.
<http://eurlex.europa.eu/legalcontent/ET/TXT/PDF/uri=CELEX:52008DC0030&qid=1493311467182&from=EN> (01.23.2008).
12. **Hartšuk, V., Jaaniso, V., Just, A., Just, E., Loorits, K., Masso, T., Mägi, R., Otsmaa, V.,**

- Peipman, T., Pukk, O., Rohusaar, J., Talvik, I., Voltri, V., Õiger, K. (2014).** Konstruktori käsiraamat. Eesti. Ehitame Kirjastus.
13. **McGraw, J.H., Hill, J. A. (2003).** *Dictionary of Chemistry*. Ameerika Ühendriigid: The McGraw-Hill Companies, Inc.
14. **Pidgeon, S. (2004).** *Dictionary of Physics*, Saksamaa: Spektrum Akademischer Verlag.
(05.03.2017)
15. „Thermodynamics – Theory“. (2017). 03.15.2017, http://www.ecourses.ou.edu/cgi-bin/ebook.cgi?topic=th&chap_sec=01.3&page=theory

SUMMARY

Vacuum insulation panels are perspective product and there is no doubt that in the next few decades these will be used in civil engineering. The thermal conductivity [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] of vacuum insulation panels is about ten times smaller than in any other classical insulation material. That gives an opportunity to use this panel in such places where classical solutions are not sufficient. For example these vacuum insulation can be used on heritage protection areas. In order to start using vacuum insulation panels in civil engineering it is necessary to study some properties that might scare people. One of the most important thing to study about vacuum insulation panel is to see how its properties change after damaging panels.

In this masters thesis it is shown that damaged panels lose significantly its thermal conductivity [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] but at the same time it proved that while acting correctly it is possible to minimize the loss of thermal conductivity [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$]. Acting correctly means that when the panels surface gets damaged with a little whole then it is forbidden to move the panel. It will make the silica particles to move and during that the air will get inside the panel and that means the panel is not usable anymore. If the panel is not moved after damaging it and the hole is covered with weather resistance tape then practically no air will get inside the panel. After the hole is covered, it can be moved again and it will not ruin the panel. In this master thesis thermal resistant tape is used because it can withstand temperature over 200°C . In real constructions it is not suitable because it is not weather resistant.

In stage I source data was found that was used in the next stages. In stage I a conclusion was made that thermal conductivity $0,007(\text{W/m}^*\text{K})$ was equal to the average temperature rise of eight panels on heat plate on 200°C after five minutes. This means that the normal temperature rise is $1,37^{\circ}\text{C}$ that is equal to thermal conductivity $0,007(\text{W/m}^*\text{K})$.

In stage II some panels were damaged and some of the damaged panels were covered with heat resistant tape. This gives an opportunity to compare the results with source data and to see how much does the thermal conductivity [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] rise when the air enters the panel. The assumption was that panels which holes were not covered lose a lot of its thermal resistance. The study showed that the difference between normal and damaged panels is up to 8,7 times that makes the total thermal conductivity [$\lambda(\text{W/m}^*\text{K})$] of the panel 0,0609(W/m*K). But the stage II also showed that the panels which holes were covered did not lose practically any of its thermal resistance.

In stage III, all damaged panels were placed on a climate chamber where they went through five cycles with different durations. That enabled damaged panels to absorb moisture from the air and therefore it lowered thermal resistance up to 26%. Panels which holes were covered with heat resistant tape did not show any difference compared to stages I and II.

Study showed that the vacuum insulation panels are not as fragile as it was thought before. Hopefully this knowledge gives more confidence to use this material in civil engineering where classical insulation material might not be good enough.

Unfortunately there were too few panels to make any absolute conclusions because too few panels means that there is high risk for anomalies. But the fact that all the assumptions were similar to the final results it is certain that this study is a great basis for similar future studies.

In order to improve the durability of vacuum insulation panels it would be necessary to develop a mastic that can be applied on a surface of a panel and its purpose is to seal the potential hole made by a screw or nail. This mastics should be simultaneously viscose and sticky so it would be possible to apply it both on the construction site as well as in the factory. This mastics should be able to fill the potential hole in the panel thanks to the fact that vacuum in the panel tries to pull air in through the hole. At the time this type of matics has not been developed but the possibility of having such mastics could help to improve the use of vacuum insulaton panels in civil engineering.

LISAD

Lisa 1. Katsekehade temperatuuride tõus katse I etapis

Tabel 1: Katsekeha A - I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	25,3	31,2	5,9
Pos 2	24,9	31,1	6,2
Pos 3	25,3	27,6	2,3
Pos 4	24,00	27,6	3,6
Pos 5	23,1	26,00	2,9
Pos 6	25,5	28,00	2,5
Pos 7	25,2	28,4	3,2
Pos 8	23,00	28,6	5,6
Pos 9	24,2	26,8	2,6

Tabel 1: Katsekeha B – I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	23,7	26	2,3
Pos 2	23,7	25,9	2,2
Pos 3	26,0	25,9	0,1
Pos 4	24,2	25,7	1,5
Pos 5	24,4	26,1	1,7
Pos 5	24,4	26,2	1,8
Pos 6	25,8	25,9	0,1
Pos 8	24	26,6	2,6
Pos 9	25,3	26,2	0,9

Tabel 2: Katsekeha C – I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	28,2	28,2	0
Pos 2	25,6	26,3	0,7
Pos 3	25,7	26,8	1,1
Pos 4	25,5	26,1	0,6
Pos 5	25,1	26,3	1,2
Pos 6	25,4	26,4	1
Pos 7	25,8	25,6	0,2
Pos 8	25,6	26,1	0,5
Pos 9	26	26,8	0,8

Tabel 3: Katsekeha D – I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	24,8	27,1	2,3
Pos 2	25,2	25,7	0,5
Pos 3	26,3	27,5	1,2
Pos 4	25,3	28,9	3,6
Pos 5	25,9	28,8	2,9
Pos 6	24,4	27,1	2,7
Pos 7	25,2	27,3	2,1
Pos 8	24,4	27,5	3,1
Pos 9	24,6	27,7	3,1

Tabel 4: Katsekeha E – I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	26,6	28,2	1,6
Pos 2	26,7	28,9	2,2
Pos 3	26,6	27,5	0,9
Pos 4	25,9	27,6	1,7
Pos 5	25,7	28,1	2,4
Pos 6	26,3	28,2	1,9
Pos 7	25,3	26,7	1,4
Pos 8	24,3	29,2	4,9
Pos 9	24,3	29,1	4,8

Tabel 5: Katsekeha F – I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	27,9	28,6	0,7
Pos 2	27,8	29,1	1,3
Pos 3	27,9	28,6	0,7
Pos 4	27,4	27,9	0,5
Pos 5	27,5	28,6	1,1
Pos 6	26,0	26,6	0,6
Pos 7	25,8	26,8	1
Pos 8	26,4	28,1	1,7
Pos 9	26,4	25,5	0,9

Tabel 6: Katsekeha G - I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	27,7	27,8	0,1
Pos 2	27,5	28,2	0,7
Pos 3	27,8	28,8	1
Pos 4	27,4	28,8	1,4
Pos 5	27,7	27,9	0,2
Pos 6	25,5	26,3	0,8
Pos 7	26	27,9	1,9
Pos 8	26,2	27,9	1,7
Pos 9	26,3	27,9	1,6

Tabel 7: Katsekeha H – I etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	27,1	27,8	0,7
Pos 2	27,0	27,5	0,5
Pos 3	26,8	26,9	0,1
Pos 4	26,4	26,9	0,5
Pos 5	26,9	27,2	0,3
Pos 6	27,1	27,6	0,5
Pos 7	26,2	26,6	0,4
Pos 8	25,6	25,8	0,2
Pos 9	27	27,2	0,2

Lisa 2. Katsekehade paksuse muutus katse I etapis

Tabel 8: Katsekeha A – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,06	10,17	0,11
Pos 2	9,61	9,77	0,16
Pos 3	9,12	9,43	0,31
Pos 4	9,15	9,45	0,3
Pos 5	9,55	9,5	-0,05
Pos 6	9,17	9,3	0,13

Tabel 9: Katsekeha B – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,43	10,93	0,5
Pos 2	10,34	10,81	0,47
Pos 3	10,9	11,04	0,14
Pos 4	10,73	10,72	-0,01
Pos 5	10,65	10,22	-0,43
Pos 6	10,47	10,10	-0,37

Tabel 10: Katsekeha C – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,31	10,32	0,01
Pos 2	10,04	10,08	0,04
Pos 3	9,99	10,3	0,31
Pos 4	10,09	10,08	-0,01
Pos 5	10,27	10,22	-0,05
Pos 6	10	9,91	-0,09

Tabel 11: Katsekeha D – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,44	10,04	-0,4
Pos 2	10,48	10,33	-0,15
Pos 3	10,15	10,03	-0,12
Pos 4	10,32	10,39	0,07
Pos 5	10,03	10,1	0,07
Pos 6	10,02	9,96	-0,06

Tabel 12: Katsekeha E – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,24	10,18	-0,06
Pos 2	10,34	10,13	-0,21
Pos 3	10,08	10,65	0,57
Pos 4	10,49	10,64	0,15
Pos 5	10,04	9,86	-0,18
Pos 6	10,09	9,92	-0,17

Tabel 13: Katsekeha F – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,33	10,25	-0,08
Pos 2	10,67	10,68	0,01
Pos 3	10,04	10,06	0,02
Pos 4	10,69	10,4	-0,29
Pos 5	9,91	9,9	-0,01
Pos 6	10,31	10,11	-0,2

Tabel 14: Katsekeha G – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,1	9,69	-0,41
Pos 2	9,94	9,63	-0,31
Pos 3	10,11	9,82	-0,29
Pos 4	9,65	9,7	0,05
Pos 5	9,76	9,46	-0,3
Pos 6	9,7	9,52	-0,18

Tabel 15: Katsekeha H – paksuse muutus kuumutamisel

Materjali paksus			
	Paksus enne kuumutamist (mm)	5min	Paksuse muutus
Pos 1	10,30	10,26	-0,04
Pos 2	10,45	10,56	0,11
Pos 3	10,14	10,19	0,05
Pos 4	10,62	10,21	-0,41
Pos 5	10,03	9,96	-0,07
Pos 6	10,36	10,21	-0,15

Lisa 3. Katsekehade temperatuuride tõus katse II etapis

Tabel 16: Katsekeha B – II etapi temperatuuride muutus

Materjalide temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	24,5	25,9	1,4
Pos 2	24,8	26	1,2
Pos 3	25,2	27,1	1,9
Pos 4	23,9	25,4	1,5
Pos 5	24,6	26,3	1,7
Pos 6	25,9	26,7	0,8
Pos 7	24,8	27,1	2,3
Pos 8	24,7	26,1	1,4
Pos 9	25,6	26,7	1,1

Tabel 17: Katsekeha C – II etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	24,9	28,9	4
Pos 2	25	26,5	1,5
Pos 3	23,6	29,8	6,2
Pos 4	23,6	28,2	4,5
Pos 5	23,7	28,4	4,7
Pos 6	23,7	28,5	4,8
Pos 7	23,7	28,5	4,8
Pos 8	23,6	28,3	4,6
Pos 9	23,5	27,8	4,3

Tabel 18: Katsekeha D – II etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuur			
	Temperatuur	5 min	Temp. erinevus
Pos 1	24,1	29,2	5,1
Pos 2	24	29,6	5,6
Pos 3	26,7	30,1	3,4
Pos 4	26,8	30,3	3,5
Pos 5	26,9	29,4	2,5
Pos 6	25,2	28,6	3,4
Pos 7	27	29,2	2,2
Pos 8	26,8	28,9	2,1
Pos 9	23,2	27,6	4,4

Tabel 19: Katsekeha E – II etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuur			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	25,2	26,8	1,6
Pos 2	25,0	26,2	1,2
Pos 3	27,8	28,4	0,6
Pos 4	27,9	28,9	1
Pos 5	26,7	28,6	1,9
Pos 6	26,9	28,5	1,6
Pos 7	27	29,8	2,8
Pos 8	27,1	29,5	2,4
Pos 9	25,6	29,2	3,6

Tabel 20: Katsekeha F – II etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	25,0	25,3	0,3
Pos 2	24,9	26,6	1,7
Pos 3	28,1	29,6	1,5
Pos 4	28,0	29,6	1,6
Pos 5	28,0	29,6	1,6
Pos 6	26,2	28,1	1,9
Pos 7	28,0	28,5	0,5
Pos 8	28,0	28,5	0,5
Pos 9	27,9	28,1	0,2

Tabel 21: Katsekeha G – II etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	26,6	30,7	4,1
Pos 2	25,3	28,1	2,8
Pos 3	26,6	30,7	4,1
Pos 4	27,7	30,7	3
Pos 5	26,9	30,6	3,7
Pos 6	25,7	28,8	3,1
Pos 7	27,6	30,2	2,6
Pos 8	27,5	30,2	2,7
Pos 9	25,3	28,6	3,3

Tabel 22: Katsekeha H – II etapi temperatuuride muutus

Materjali temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	26,8	29,8	3
Pos 2	27,2	30,5	3,3
Pos 3	26,5	29,6	3,1
Pos 4	28,1	31,9	3,8
Pos 5	28,0	32,0	4
Pos 6	27,4	29,7	2,3
Pos 7	27,3	29,6	2,3
Pos 8	27,2	30,8	3,6
Pos 9	27,2	31,1	3,9

Lisa 4. Katsekehade temperatuuride tõus katse III etapis

Tabel 23: Katsekeha D – III etapi temperatuuride muutus

Materjalide temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	26,2	30,8	4,6
Pos 2	24,3	30,1	5,8
Pos 3	25,9	29,8	3,9
Pos 4	25,9	31,0	5,1
Pos 5	24,8	29,4	4,6
Pos 6	25,6	30,3	4,7
Pos 7	25,2	30,5	5,3
Pos 8	24,9	29,8	4,9
Pos 9	25,0	29,5	4,5

Tabel 24: Katsekeha E – III etapi temperatuuride muutus

Materjalide temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	25,2	26,8	1,6
Pos 2	25	26,2	1,2
Pos 3	27,8	29,1	1,3
Pos 4	27,9	28,9	1
Pos 5	26,7	28,6	1,9
Pos 6	26,9	28,5	1,6
Pos 7	27	29,8	1,8
Pos 8	27,9	29,5	1,6
Pos 9	26,6	29,2	2,6

Tabel 25: Katsekeha F – III etapi temperatuuride muutus

Materjalide temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	25,0	25,3	0,3
Pos 2	24,9	26,6	1,7
Pos 3	28,1	29,6	1,5
Pos 4	28,0	29,6	1,6
Pos 5	28,0	29,6	1,6
Pos 6	26,2	28,1	1,9
Pos 7	28,0	28,5	0,5
Pos 8	28,0	28,5	0,5
Pos 9	27,9	28,1	0,2

Tabel 26: Katsekeha G – III etapi temperatuuride muutus

Materjalide temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	27,6	30,7	2,9
Pos 2	24,3	28,1	3,8
Pos 3	25,6	30,7	5,1
Pos 4	25,7	30,7	5
Pos 5	25,9	30,6	4,7
Pos 6	24,7	28,8	4,1
Pos 7	25,6	30,2	4,6
Pos 8	28,6	30,2	1,6
Pos 9	25,3	28,6	3,3

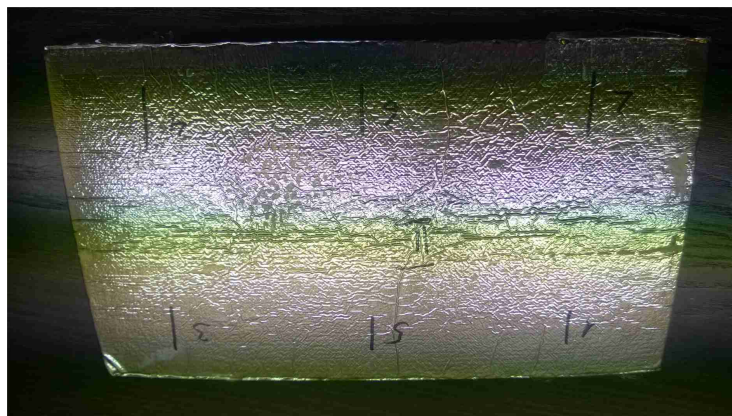
Tabel 27: Katsekeha H – III etapi temperatuuride muutus

Materjalide temperatuurid			
	Temperatuur	5min	Temp. erinevus
Pos 1	26,5	30,1	3,6
Pos 2	24,1	28,7	4,6
Pos 3	24,9	29,4	4,5
Pos 4	25,2	30	4,8
Pos 5	26,1	29,6	3,5
Pos 6	25,1	29,4	4,3
Pos 7	24,5	29,1	4,6
Pos 8	24,9	28,4	3,5
Pos 9	24,2	27,8	3,6

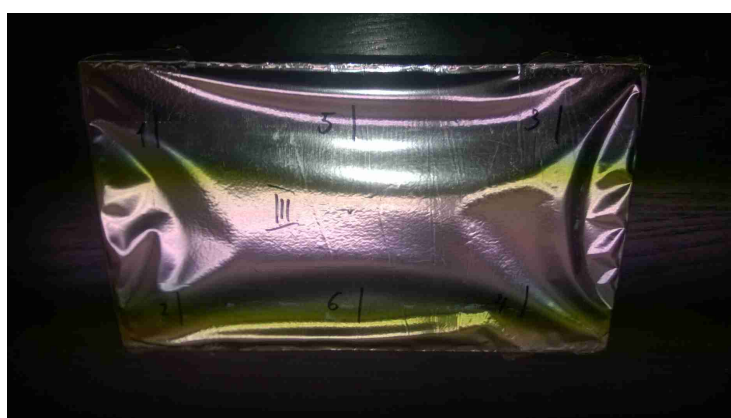
Lisa 5. Katsekehade pildid



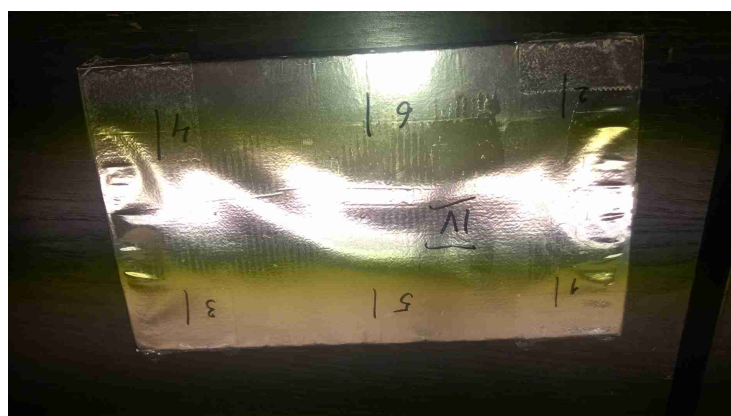
Joonis 1: Katsekeha A (autori foto)



Joonis 2: Katsekeha B (autori foto)



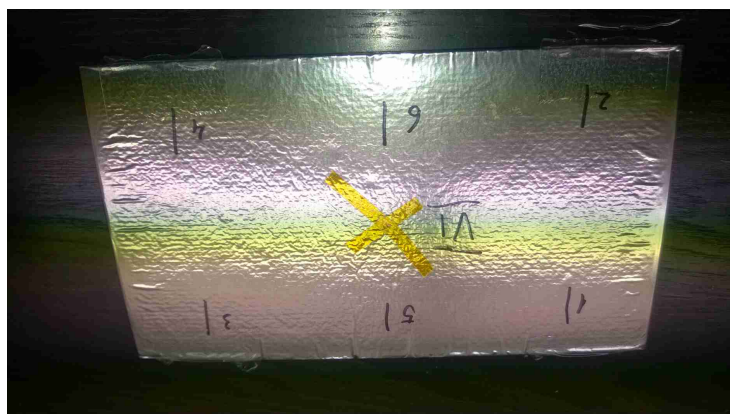
Joonis 3: Katsekeha C (autori foto)



Joonis 4: Katsekeha D (autori foto)



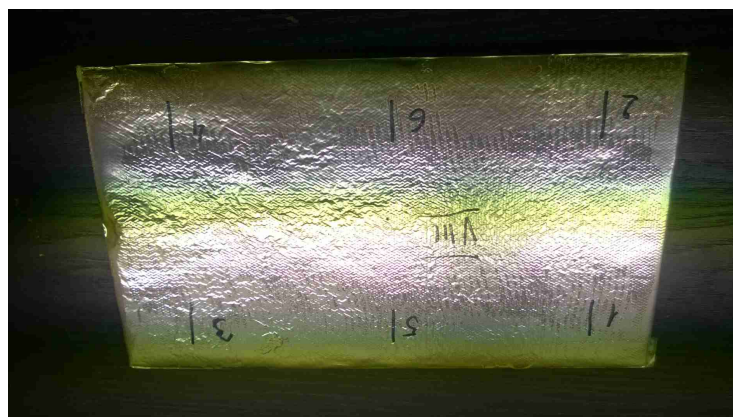
Joonis 5: Katsekeha E (autori foto)



Joonis 6: Katsekeha F (autori foto)

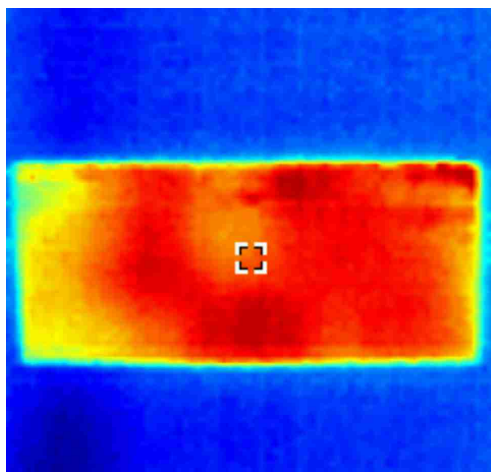


Joonis 7: Katsekeha G (autori foto)

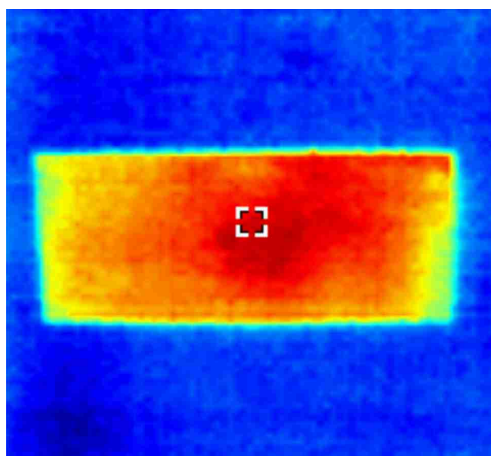


Joonis 8: Katsekeha H (autori foto)

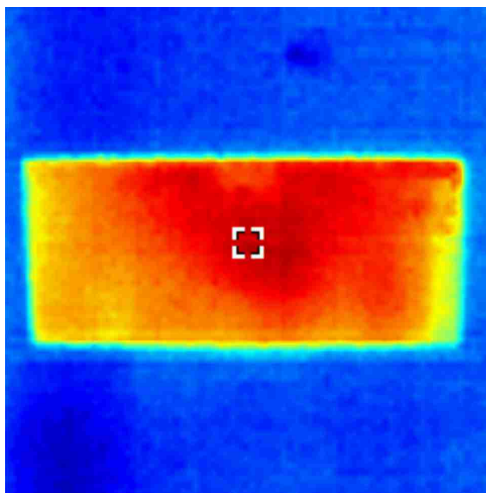
Lisa 6. Katsekehade termopildid



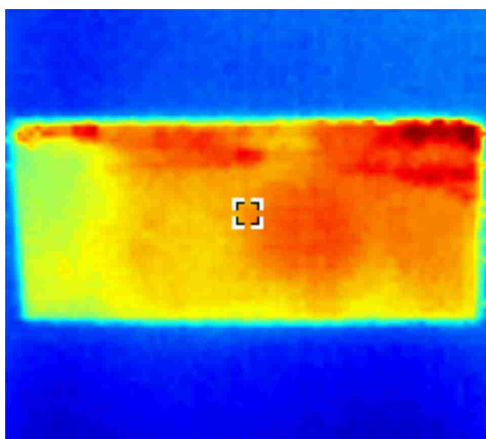
Joonis 9: Katsekeha A (autori foto)



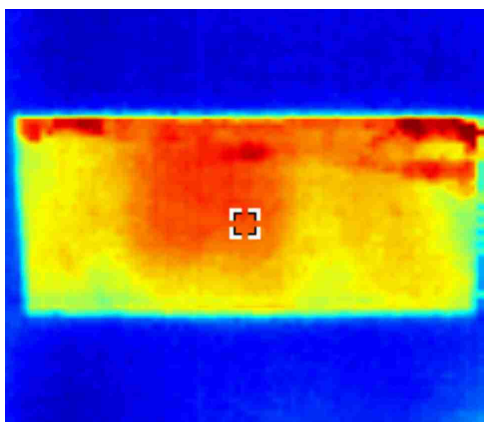
Joonis 10: Katsekeha B (autori foto)



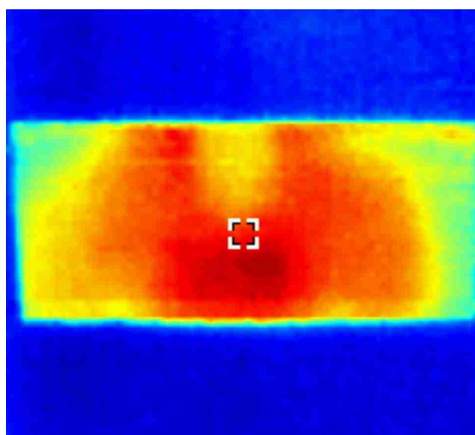
Joonis 11: Katsekeha C (autori foto)



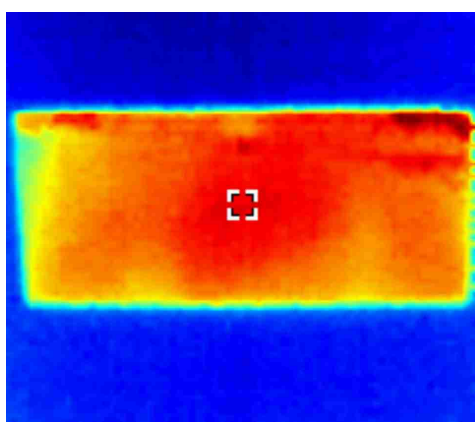
Joonis 12: Katsekeha D (autori foto)



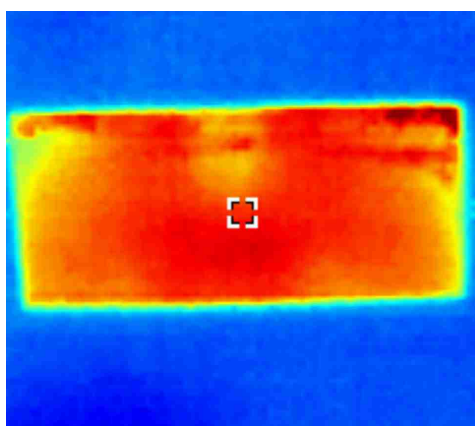
Joonis 13: Katsekeha E (autori foto)



Joonis 14: Katsekeha F (autori foto)



Joonis 15: Katsekeha G (autori foto)



Joonis 16: Katsekeha H (autori foto)